



学科发展战略研究报告

工程热物理与能源利用 学科发展战略研究报告 (2011~2020)

国家自然科学基金委员会
工程与材料科学部



科学出版社

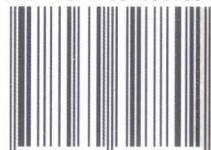


学科发展战略研究报告系列

- 机械工程学科发展战略报告(2011~2020)
- 水利科学与海洋工程学科发展战略研究报告(2011~2015)
- 工程热物理与能源利用学科发展战略研究报告(2011~2020)

www.sciencep.com

ISBN 978-7-03-032780-2



科学出版社 工程技术分社
电话: (010) 64019417
E-mail: gcjs@mail.sciencep.com

定价: 80.00 元

工程热物理与能源利用 学科发展战略研究报告 (2011 ~ 2020)

国家自然科学基金委员会
工程与材料科学部

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是国家自然科学基金委员会工程与材料科学部的学科发展战略研究报告之一。这一系列研究报告是国家自然科学基金委员会工程与材料科学部为不断促进本领域的基础研究工作,瞄准国际学科发展前沿,面向未来国家经济建设和社会发展的重大需求,着力解决我国工程与材料领域中的重要科学和技术基础问题,增强国家原始创新和技术创新能力,而精心组织出版的系列学科发展战略研究报告。

本书的撰写站在国家利益和学科总体的高度,综合考虑国际学术发展动向和中国实际,论述了工程热物理与能源利用学科的内涵、战略地位以及各分支领域的界定,详细分析了各分支领域,包括工程热力学、内流流体力学、传热传质学、燃烧学、多相流、可再生能源等的国内外研究现状、发展趋势及科学问题,进一步明确了我国工程热物理与能源利用研究中的中、近期发展方向和目标,拟定出了 2011~2020 年期间的优先发展方向、资助领域和发展思路。

本书作为学科发展战略研究报告,内容既具有前瞻性和战略性,又具有针对性和可操作性。本书可为国家自然科学基金委员会工程与材料科学部工程热物理与能源利用学科遴选 2011~2020 年期间优先领域提供依据,同时也可供从事工程热物理与能源利用学科研究的科研人员、管理人员阅读和参考,也可作为高等院校教师、研究生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

工程热物理与能源利用学科发展战略研究报告(2011~2020)/国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. —北京:科学出版社,2011.11
ISBN 978-7-03-032780-2

I. ①工… II. ①国… III. ①工程热物理学-发展战略-研究报告-中国-2011~2020 ②能源利用-发展战略-研究报告-中国-2011~2020
IV. ①TK121②TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 233171 号

责任编辑:刘宝莉 陈 捷/责任校对:林青梅
责任印制:赵 博/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京天时彩色印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 11 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2011 年 11 月第 1 次印刷 印张: 23 1/2 字数: 475 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《工程热物理与能源利用学科发展战略研究报告 (2011~2020)》编著委员会

指导专家组 (按姓氏汉语拼音排序):

蔡睿贤	岑可法	陈国邦	陈懋章	陈学俊	范维澄	高泰荫	过增元
贺德馨	蒋洪德	林宗虎	刘 伟	刘志刚	卢文强	马重芳	倪维斗
秦裕琨	施明恒	苏万华	陶文铨	王补宣	王仲奇	翁史烈	吴承康
吴克启	吴文权	吴玉林	徐建中	徐旭常	徐益谦	宣益民	杨晓西
章明川	郑楚光	周 远	庄逢辰				

工作组 (按姓氏汉语拼音排序):

郭烈锦	何雅玲	黄佐华	纪 军	金红光	刘 涛	孙晓峰	谈和平
王如竹	徐明厚						

撰写组:

第1章:	刘 涛	纪 军	金红光	陈 斌	隋 军		
第2章:	金红光	段远源	何雅玲	罗二仓	隋 军	于达仁	郑丹星
第3章:	孙晓峰	黄典贵	聂超群	席 光	袁 新	张楚华	
第4章:	谈和平	丁 静	王秋旺	吴慧英	徐学敏	宣益民	张 兴
	张欣欣	张寅平					
第5章:	黄佐华	范 玮	黄 震	齐 飞	徐明厚	杨立中	尧命发
	张 健	周怀春					
第6章:	郭烈锦	陈 斌	蔡小舒	樊建人	陆慧林	宋永臣	徐进良
第7章:	王如竹	郭烈锦	廖 强	骆仲浹	李 勇	马隆龙	

秘书组:

刘 涛	纪 军	何雅玲	陈 斌
-----	-----	-----	-----

序

基础研究以深刻认识自然现象、揭示自然规律，获取新知识、新原理、新方法和培养高素质创新人才等为基本使命，是高新技术发展的重要源泉，是培育创新人才的摇篮，是建设先进文化的基础，是未来科学和技术发展的内在动力。

胡锦涛总书记强调：“基础研究是科技进步的先导，是自主创新的源泉。”温家宝总理指出：“原始创新是我国科技发展的灵魂，是民族发展的不竭动力，是支撑国家崛起的筋骨。基础和前沿研究是人类认识客观世界基本规律的科学活动，是新知识的源泉，是新技术、新发明的先导，一旦取得重大突破，往往会催生新的科技革命，以至推动人类社会发生变革。纵观世界科技发展的历史，每一场科技革命的出现，每一个新兴产业的崛起，无不依赖于基础研究领域的重大原始创新。没有基础和前沿领域的原始创新，自主创新就没有根基。（中国）作为一个大国，必须有自己的基础研究和前沿研究。”

基础研究的战略定位，《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》（简称《规划纲要》）已经做了明确说明，从学科发展、科学前沿、国家需求、重大科学研究计划等四个方面对基础研究进行了具体部署。发展基础研究要坚持鼓励自由探索与服务国家目标相结合，遵循科学发展的规律，重视科学家的探索精神，突出科学的长远价值，稳定支持，超前部署，并根据科学发展的新动向，进行动态调整。在把握当今世界科学发展的新特点、新趋势、新机遇的基础上，通过学科发展战略研究，实现对基础研究领域的科学布局。

作为国家支持基础研究的主要资助渠道，国家自然科学基金委员会（简称基金委）在落实《规划纲要》中十分重视学科战略规划的重要性和紧迫性，分别与中国工程院和中国科学院开展合作，共同谋划我国学科未来发展战略。通过与中国工程院设立的“中国工程科技中长期发展战略研究”联合基金，对未来20年影响我国可持续发展、影响国家竞争力、影响国家安全的重大工程科技发展战略开展研究，针对制约我国经济社会发展的工程科技“瓶颈”问题提出解决方案。在中国科学院合作中，立足现在，着眼未来，展望到2020年我国各学科的发展趋势，谋划未来10年促进各学科均衡协调可持续发展的战略思路和政策措施。

基金委党组对学科发展战略研究提出了明确的要求，主要任务是分析我国学

科技发展规律、基础研究规律、人才培养规律和环境建设需求。提出了“立足科学发展、完善体制机制、体现科学民主”的指导思想；突出“更加侧重基础、更加侧重前沿和更加侧重人才”的战略定位；强调在统筹把握科学前沿发展需求和国家战略需求的基础上，深入分析学科发展特点和人才成长规律，明确未来一个时期促进我国基础学科均衡协调可持续发展的战略思路和保障措施。

工程与材料科学是从工程实践和应用的基础上发展起来的技术基础学科。其学科发展战略研究，既要强调科学基金的基础性与前瞻性，又要密切结合国家社会、经济发展的战略目标。工程热物理与能源利用学科（简称工程热物理学科）是支撑社会物质财富生产的重要基础之一，其基本任务是以自然科学为基础，研究能量以热和功以及其他更多能量形式在转化、传递中的基本规律及其利用的技术基础科学，目前已经扩展到利用工程热物理基本原理对包括可再生能源在内的多种能源转化的研究。目前，我国在工程热物理学科的研究水平与世界先进水平还有明显差距，特别是在实验研究方面差距很大，能源科技开发研究投资强度过低，重应用、轻基础的倾向长期存在，试验设备和测试手段落后，许多重要方向性研究还处于空白或薄弱状态。

我国社会经济正处在一个快速发展的时期，面对能源和资源短缺、环境污染、气候变化等全球性问题，工程热物理学科将在能源和环境科技方面寻求革命性突破。工程热物理学科的建立源于蒸汽动力装置发明和广泛应用所引起的工业革命的极大推动，从创立最基础的热力学、热机学开始，逐步发展、完善成为独立的技术基础学科。工程热物理学科为各种能源动力技术的发展提供理论支撑和源泉，是能源科技进步的重要依托。需要在能源科学基础研究上正确把握关键科学发展方向，建立一支结构合理、精干和稳定的基础性研究的科研队伍，扶持与建设一批具有较高创新能力的高水平能源科学研究基地，促使我国工程热物理科学基础研究有更多的学科分支和领域接近或达到国际先进水平。

工程热物理学科组织本学科领域的专家在广泛研讨的基础上，撰写出这本具有鲜明学科特色的《工程热物理与能源利用学科发展战略研究报告（2011 ~ 2020）》。通过对工程热物理学科现状、趋势、热点、发展规律以及重大产业需求的深入分析，总结了工程热物理学科在新时代背景下所呈现的研究特点。根据学科未来的发展趋势和科学前沿，并密切结合国家社会、经济发展的重大需求，提出了工程热物理学科未来5 ~ 10年发展的基本框架、优先资助领域和综合交叉领域，充分体现了基金委提出的“三个更加侧重”的战略思想，达到了本次学科战略规划研究的基本要求。

希望通过此次战略研究,我们能够以全球化的视野,从当今世界工程热物理领域中找到关键的科学前沿问题,凝练出具有战略意义的科学问题,拓展工程热物理学科基础研究的科学内涵,通过关键科学前沿问题和重大基础科学问题的突破带动中国工程热物理学科基础研究的原始创新。也希望在本报告的引导下,有更多的科技工作者特别是青年科技工作者投身工程热物理领域基础科学研究,围绕所凝练出的学科前沿领域,实现重大科学问题的突破,产生若干在国际上具有重要影响的原创性基础研究成果,引领工程热物理学科国际竞争的前沿,占据科学技术制高点。

相信工程热物理学科领域的科学家们能够肩负起这一崇高的使命。

国家自然科学基金委员会副主任

中国科学院院士



2011年10月

前 言

能源是可以直接或经过加工转换提供人类所需光、热、电、声、机械功等任一形式能量的载能体资源。能源科学内涵丰富,研究对象广泛,是一门综合性强、涉及面广、与国民经济密切相关的学科。历史经验表明,能源科学与能源科技的发展是密切相关和相互促进的。社会的需求呼唤能源科学,能源科学理论的研究与应用不断推动能源技术的突破,以促进社会经济发展和生产力水平提高。工程热物理与能源利用学科(简称工程热物理学科)是研究能量以热和功以及其他更多能量形式在转化、传递中的基本规律及其利用的技术基础科学,主要包括工程热力学、制冷与低温和热力系统动态学、内流流体力学、传热传质学、多相流、燃烧学、热物性和热物理测试技术基础、可再生能源利用中的热物理问题,以及与工程热物理与能源利用领域相关的问题等内涵,既有针对基本现象和过程特性认识,又有基础理论探索和技术创新研究。

基础研究的原创性项目是国际竞争的前沿和制高点,如何在国际学术前沿和制高点上找到学科的位置并明确战略发展的主攻方向,是我们面临的重要课题。我国社会经济正处在一个飞速发展的时期,能源需求量在未来几十年仍将快速增长,能源资源紧缺和高效洁净转换利用已成为制约我国经济发展的瓶颈问题。需要在能源科学基础研究上正确把握关键科学发展方向,建立一支结构合理、精干和稳定的基础性研究的科研队伍,扶持与建设一批具有较高创新能力的高水平能源科学研究基地,促使我国能源科学基础研究有更多的学科分支和领域接近或达到国际先进水平。

国家自然科学基金委员会(简称基金委)自成立后曾多次组织过不同层面的发展战略研究。工程热物理学科在20世纪80年代后期,90年代初以及2005年,分别组织撰写出版了《自然科学发展战略调研报告—工程热物理与能源利用》和《工程热物理与能源利用学科发展战略研究报告(2006~2010)》。这两个战略研究报告为国家自然科学基金委员会在本学科的优先资助领域遴选和过去近20年的基金资助发挥了重要作用,更为青年科研工作者提供了积极申请基金的指南。为了充分体现和落实自然科学基金“支持基础研究,鼓励自由探索,发挥导向作用”的宗旨,工程热物理学科的研究一直致力于大力支持和促进本学科各分支领域的基础探索,强调研究工作瞄准国际学术前沿,面向国家经济建设和社会发展的未来重大需求,着力解决我国能源转换和利用领域中的重要科学问

题, 在提高能源利用领域的学术水平、增强技术创新、参与国家竞争的能力等方面发挥更重要的作用。

围绕上述目标, 结合遴选“十二五”优先领域和重点支持方向, 启动了学科发展战略研究的工作。2008年11月, 学科组织召开了工程热物理学科“十二五”发展战略研讨会。与会专家结合学科特点, 讨论了工程热物理学科“十二五”重点项目资助思路, 并对于如何“更加侧重基础, 更加侧重人才, 更加侧重前沿”, 进一步提高原始创新能力, 在基金资助模式、基金项目指南导向、基金项目评审与管理、结题验收与绩效评估等方面提出建议。这次学科发展战略与从2009年4月开始的国家自然科学基金委员会-中国科学院“2011~2020年我国学科发展战略研究”结合进行, 其中的“能源科技发展战略研究”由基金委工程热物理与能源利用学科组织, 包含以下方面: 能源科学技术发展现状与战略, 节能减排与提高能效, 煤与化石能源, 可再生能源与新能源, 电能转换、输配、储存及利用, 温室气体控制与无碳-低碳能源系统, 以及能源科学优先发展、交叉领域与发展建议。至2010年1月, 已组织不同规模的研讨会20余次, 如“工程热力学与内流体力学研讨会”、“燃烧学科发展学术研讨会”、“传热与多相流基础研究研讨会”和“可再生能源研讨会”等。通过各个研讨会, 依靠专家学者, 分析研究各分支领域当前国内外研究现状和发展趋势, 探讨学科基础研究战略, 明确我国工程热物理学科的自然科学基金重点支持方向和领域, 对能源科技基本内涵和战略定位、发展规律与发展态势、发展现状与研究前沿, 以及未来10年的重点发展方向进行了广泛深入的调研, 并进行了报告的撰写。该报告广泛听取了中国科学院院士和能源专家的修改意见, 进行了多次修改。

2010年1月在哈尔滨召开了撰稿人会议, 与会者按照基金委关于撰写学科战略研究报告的精神, 对各个领域的学科发展战略研讨进行总结, 要求在《工程热物理与能源利用学科发展战略研究报告(2006~2010)》的基础上撰写2011~2020发展战略报告。2010年1~10月, 各个章节均成初稿。期间, 为了使报告具有更高的学术水平和更强的权威性, 还邀请了国内本领域有影响的专家学者对文稿审议。各位专家认为该报告充分体现了科学民主和科学发展观, 反映了国内外发展的总体趋势, 紧密结合新时期我国国情提出了相应的发展战略思路, 同时针对报告中的不足提出了中肯的意见, 就基本内容、所分析的国内外研究现状和凝练的发展趋势等提出了许多有价值的建议, 指出了报告应该进一步修改、充实和完善的具体意见。2011年4月, 在南京召开了定稿会议, 对研究报告的撰写过程进行了认真审议、讨论, 针对出版要求, 对撰写的格式、内容做了总体的规定。为了进一步凝练战略研究报告内容, 会上对各分支学科的写作格式进行了统一规定, 补充了学科前沿的内容和最新的数据。2011年7月, 对报告进行了统

稿，形成了出版社终稿。

本学科发展战略报告在前述分别召开的共有数百专家、学者参加的分领域战略研讨会的基础上撰写，通过向国内众多同行专家征求意见，并经过修改而定稿。专家们一致认为：由于工程热物理与能源领域的不断发展，本学科之间以及本学科与外学科之间的相互交叉和渗透，根据各分支学科的特点和侧重点不同而分成六个领域撰写是合适的；报告汇集了我国工程热物理学科许多专家的聪明智慧，有相当高的学术水平；报告对本学科 2011 ~ 2020 年期间以及今后的发展特点、趋势的分析和学术观点是正确的；报告以尽可能翔实的数据，分析了国内外学科发展趋势和存在的差距与问题，这对学科的发展将起到重要的作用。

本研究报告的完成，是本学科众多专家和学者共同努力的成果和智慧的结晶，可作为工程热物理学科的大学教授、科学研究人员、专家学者、研究生以及科技界有关领导、企业界工程技术人员、科研管理工作等人士的有关人士的参考资料。本报告的出版对基金委和我国工程热物理与能源利用领域未来的基础研究具有重要的参考价值和战略指导作用。

基金委工程科学三处刘涛和纪军负责组织了工程热物理与能源利用的发展战略研讨和本研究报告的撰写、评审工作。在此，感谢所有参与《工程热物理与能源利用学科发展战略研究报告（2011 ~ 2020）》研讨、撰写、评审的专家，以及所有给予无私支持、帮助的有关人员。

编 者
2011 年 8 月

目 录

序

前言

第1章 总论	1
1.1 概述	1
1.2 战略地位	2
1.2.1 社会经济持续发展的迫切需求	3
1.2.2 能源结构优化、推进节能减排的必然趋势	4
1.2.3 资源和生态安全的双重压力	5
1.2.4 高新科学技术的推动促进	6
1.2.5 培育和发展战略性新兴产业的重要科技保障	6
1.2.6 国家创新体系建设和基础研究发展的需求	7
1.3 学科体系	9
1.3.1 学科分支	9
1.3.2 内涵与作用	10
1.4 基金资助现状	12
1.4.1 面上项目	12
1.4.2 重大项目和重点项目	14
1.4.3 国家杰出青年科学基金项目和创新群体科学基金项目	20
1.5 基金支持原则	22
1.6 工程热物理与能源利用学科发展思路	24
参考文献	26
第2章 工程热力学	28
2.1 学科内涵与应用背景	28
2.2 国内外研究现状与发展趋势	32
2.2.1 非平衡态热力学及计算统计热力学	32
2.2.2 热物性	34
2.2.3 热力循环与总能系统	35

2.2.4	制冷与低温工程学	38
2.2.5	交叉学科	39
2.2.6	工程热力学的发展与比较分析	41
2.3	研究内容与科学问题	43
2.3.1	非平衡热力学及计算统计热力学	43
2.3.2	热物性	49
2.3.3	热力循环及总能系统	51
2.3.4	制冷与低温工程学	55
2.3.5	交叉学科	57
2.4	近期优先领域和重点支持方向	61
2.4.1	非平衡态热力学及计算统计热力学	61
2.4.2	热物性	62
2.4.3	热力循环和总能系统	63
2.4.4	制冷与低温工程学	66
2.4.5	交叉学科发展方向与目标	68
	参考文献	70
第3章	热机气动热力学与流体机械	72
3.1	学科体系、研究范围和任务	72
3.2	战略地位和国内外发展现状	72
3.2.1	燃气轮机与蒸汽轮机	72
3.2.2	航空发动机	73
3.2.3	流体机械	74
3.3	目前和今后 10 年本领域科学研究牵引动力的分析	75
3.4	重点基础研究内容建议	76
3.4.1	叶轮机械中的计算流体力学	76
3.4.2	叶轮机械中先进的实验技术	78
3.4.3	叶轮机械的非定常流动及流固耦合机理	79
3.4.4	叶轮机械气动声学基础问题	82
3.4.5	非定常流动体系下的叶轮机械设计理论	82
3.4.6	叶轮机械中的流动控制技术	83
3.4.7	非常规叶轮机械及其流动机理	86
3.4.8	其他研究方向	88
3.4.9	学科交叉与拓展方向	92
3.4.10	近 5 年来论文发表情况分析	93

参考文献	97
第4章 传热传质学	99
4.1 学科内涵、学术意义与应用背景	99
4.1.1 概述	99
4.1.2 学科内涵	99
4.1.3 前沿背景与动机的演变	101
4.1.4 机遇与挑战	103
4.2 国内外研究现状与发展趋势	104
4.2.1 概述	104
4.2.2 导热	105
4.2.3 对流传热与传质	110
4.2.4 辐射传热	118
4.2.5 传热传质测试技术	127
4.2.6 交叉研究	134
4.2.7 研究方法和技术手段	142
4.2.8 差距分析	143
4.3 研究内容与科学问题	146
4.3.1 研究内容	146
4.3.2 科学问题	148
4.4 近期优先领域和重点支持方向	149
4.4.1 支持总体考虑	149
4.4.2 基础创新探索优先方向	150
4.4.3 经典内涵基础研究优先方向	152
4.4.4 重点重大项目支持方向	154
4.5 建议	155
参考文献	156
第5章 燃烧学	162
5.1 学科内涵、学术意义与应用背景	162
5.2 国内外研究现状与发展趋势	169
5.2.1 基础燃烧理论	169
5.2.2 燃烧化学反应动力学	174
5.2.3 气液燃料燃烧	177
5.2.4 固体燃料燃烧	190

5.2.5 火灾燃烧	194
5.2.6 燃烧诊断	197
5.2.7 论文发表情况分析	208
5.3 科学问题及优先资助领域	212
5.3.1 基础燃烧理论	212
5.3.2 燃烧化学反应动力学	214
5.3.3 气液燃料燃烧	215
5.3.4 固体燃料燃烧	218
5.3.5 火灾燃烧	219
5.3.6 燃烧诊断	220
参考文献	220
第6章 多相流	223
6.1 学科内涵、学术意义与应用背景	223
6.2 国内外研究现状与发展趋势	224
6.2.1 多相流数理模型及数值模拟方法	224
6.2.2 极端条件下的两相流	232
6.2.3 多相流与传递参数测试方法研究发展趋势	239
6.2.4 我国多相流学科的重要研究进展	246
6.2.5 论文发表情况分析	251
6.3 研究内容与科学问题	254
6.3.1 多相流基本现象与规律	255
6.3.2 数值模拟理论与方法	256
6.3.3 能源高效转化和清洁利用的多相流	256
6.3.4 多相流的实验与测量新技术及方法	257
6.3.5 多相流与其他学科的相互渗透及交叉	258
6.4 重点支持方向	258
6.4.1 多相流基本现象与规律	258
6.4.2 多相流数理模型与数值模拟技术	259
6.4.3 高新科技中的两相流	261
6.4.4 多相流及传递问题的测试方法	263
6.4.5 常规能源高效节约的多相流理论基础	264
6.4.6 能源可再生转化利用的多相流理论基础	268
6.4.7 CO ₂ 地质封存研究中的多相流问题	270

6.4.8 多相流与其他科学的相互渗透及交叉	272
参考文献	273
第7章 可再生能源	276
7.1 学科内涵、学术意义与应用背景	276
7.1.1 学科内涵	276
7.1.2 前沿背景与动机的演变	280
7.2 国内外研究现状与发展趋势	280
7.2.1 太阳能	280
7.2.2 生物质能	287
7.2.3 风能	293
7.2.4 地热能	297
7.2.5 海洋能	298
7.2.6 论文情况统计与分析	301
7.3 研究内容与科学问题	307
7.3.1 太阳能	308
7.3.2 生物质能	310
7.3.3 风能	312
7.3.4 地热能	313
7.3.5 海洋能	314
7.4 近期优先领域和重点支持方向	315
7.4.1 太阳能	315
7.4.2 生物质能	316
7.4.3 风能	317
7.4.4 地热能	318
7.4.5 海洋能	318
参考文献	318
附录1 工程热物理与能源利用学科资助重点项目一览表 (2001 ~ 2010 年) ...	321
附录2 工程热物理与能源利用学科部分重要国际学术会议	325
附录3 工程热物理与能源利用学科相关重要国际学术期刊列表	327
附录4 工程热物理与能源利用学科有关实验室简介	343
附录4.1 国家重点实验室	343
附录4.2 省部级重点实验室	350

第1章 总 论

1.1 概 述

工程热物理与能源利用学科是一门研究能量和物质在转化、传递及其利用过程中基本规律和技术理论的应用基础学科,传统研究主要针对热和功的能源形式,现今学科范畴已扩展到几乎涵盖各种能量形式、能质相互转化和有效利用的方方面面。本学科的任务是在自然科学和热物理基本规律的基础上,综合相关学科(包括数学、物理、化学、生物、信息、认知、社会科学等)基础科学的新理论、新方法,认识和揭示能量物质转化、传递的基本现象和规律,全面深入地分析能量与物质转化、传递的物理过程特性,建立物理数学模型,探究有效利用的基本规律及其应用的科学途径,为有关高新技术发展及工程问题解决提供理论依据、设计方法和技术手段,借鉴、移植和应用各科学技术领域的先进思想、方法和技术,不断创新能量物质转化、传递和高效利用的应用技术^[1]。

工程热物理与能源利用学科内涵丰富,外延广阔,是一门体系完整的应用基础学科,包括工程热力学、内流流体力学、传热传质学、燃烧学、多相流、可再生能源利用,以及和工程热物理与能源利用领域相关问题的基础性与创新性研究。随着对学科认识的不断提高,学科的内涵不断丰富,研究内容也在进一步扩大。先进的科学理念和基础科学的最新进展极大地带动了科学和技术的进步,近年来更是拓展衍生出众多前沿热点领域与方向,诸如可再生能源利用、温室气体排放控制、微纳米热物理、微细能源系统和原理、生物与生命热物理、生态与环境安全热物理等,涉及自然世界能质相互作用与转化的基本内涵和基本规律等的科学探索。

21世纪,人类正面对着能源和资源短缺、环境污染、气候变化等全球性问题,工程热物理与能源利用学科将在能源和环境科技方面寻求突破^[2,3]。目前,工程热物理与能源利用学科的发展趋势可以概括为:①对能源传递、转化、利用中基础问题和规律的探索不断深化,学科研究在不断拓宽或突破原有界限与假定,如宏观向介观、微观的过渡,常规参数向超常或极端参数的发展,以及随机、非定常、多维、多相、多过程与多因素耦合等复杂情况下的热物理问题的研究;②随着能源、环境问题的日益突出,可再生能源、温室气体控制以及能源环

境问题也成为工程热物理学科发展的重要方向之一；③不断产生的新理论、新方法和新手段，以及研究的定量化和精确化，大大促进了本学科的发展；④本学科各分支学科之间以及本学科与其他学科之间多方位、大跨度的交叉与融合，已成为当前工程热物理与能源利用学科发展的一个基本趋势与特征，学科界限越来越淡化和模糊。

1.2 战略地位

能源是国民经济发展的动力和命脉，能源开发与合理有效利用是整个社会发展的源泉和基础，标志着人类的文明和进步，决定了一个国家的科学技术水准、竞争实力和综合国力，今天更成为国家存亡和社会安全的重大问题，引起世界各国政府高度重视并作为最优先的国家战略考虑。能量的转换、传递，能源与物质的相互作用和转化，是自然界最普遍的物理现象和物质运动形式之一，几乎和所有的生产工艺过程、技术领域以及人类社会生活密切相关，这些现象和过程中的基本规律及其技术理论是能源合理有效利用的科学基础和理论依据，因此，工程热物理与能源利用学科的原理和技术也相应地具有普遍性和广泛性，在人类文明和社会进步中占据极为重要的地位。

工程热物理与能源利用学科的建立源于蒸汽动力装置发明和广泛应用所引起的工业革命的极大推动，从创立最基本的热力学、热机学开始，逐步发展、完善成为独立的技术基础学科。它为各种能源动力技术的发展提供了理论支撑和源泉，是能源科技的进步的重要依托。回顾历史，几乎可以说每一次能源动力或能源利用方面的突破都带来了生产力的飞跃、社会的发展和观念的变革。蒸汽机的发明和热力学理论的建立，促使找到从化石能源转化为功的办法，带动了世界第一次产业革命；仅仅石油的发现并没有迎来石油时代，而利用石油的内燃机的发明和推广应用才使人类进入一个新的文明时代；内燃机和蒸汽轮机的出现与发展为现代社会的机械化、电气化创造了条件；燃气轮机发动机和火箭发动机的发展，则为高速航空与宇宙时代奠定了基础；核能的开发利用拓展了人类利用能源的广阔视野。以高效和生态良性循环的更新的能源转化和利用理念，被人们广泛认同，已逐步并将继续改变人类能源的思维。显然，工程热物理与能源利用学科的基础原理和技术应用会产生巨大的经济和社会效益。

自 20 世纪 80 年代以来，化石能源的过度使用造成了严重的环境污染；同时化石能源资源终将枯竭，严重地威胁着人类的生存和发展。面对生态环境和 21 世纪社会经济可持续发展的巨大挑战，要求人类必须在提高化石能源利用效率的同时，大力发展和使用可再生能源。工程热物理和能源利用学科的发展必将顺应

时代的潮流,能源科学技术的进步会带来许多伟大的变革,产生深远影响,最终使人类社会迈向生态安全与良性循环的能源之路。

1.2.1 社会经济持续发展的迫切需求

能源的耗费数量和使用情况,标志着人类社会经济发展规模、人民生活水准和科学技术发达程度。自20世纪以来,世界能源消费有很大增长,本世纪更是惊人,预计需求必然持续上升。显而易见,现今能源与人类的关系已是密不可分,或者说没有能源就没有现代人类社会的生存与发展。

2010年我国GDP达到5.879万亿美元,超过日本的5.474万亿美元,并取代后者成为全球第二大经济体,这是我国30多年经济高速发展成就的一个写照,也是我国国力增强的“里程碑”。但我国内地的经济发展总体水平还很低,据国际货币基金组织统计,2010年我国人均GDP为4283美元,排名全球第95位,只有日本的1/10。我国仍有4300万贫困人口,相当于澳大利亚总人口的2倍^[4]。

我国国情要求继续推进社会和经济的全面进步,能源是当今国家经济快速发展最重要的战略保障之一。在我国经济快速稳定发展的同时,能耗总量也在大幅度增长。2010年,我国能源消费总量已达32.5亿t标准煤,人均一次能源消费水平约为2.38t标准煤,是世界上能源消耗的第二大国;进口原油2.39亿t,石油对外依存度超过55%,成为仅次于美国的第二大石油进口国和消费国;中国电力装机容量突破9亿kW,将在未来两年内超过美国并达到世界首位。人均电力装机0.69kW,与美国、日本、欧洲等发达国家和地区的人均2kW及以上水平仍有很大差距;人均天然气消费量为88m³,是2005年的2.4倍。煤炭在一次能源消费中占到68.7%,单位能源的二氧化碳排放强度高于世界平均水平,控制二氧化碳排放面临极大困难^[5~7]。

贯彻实施和不断完善国家的节能减排政策,极大地推动了我国的节能工作。2009年与2005年相比,万元国内生产总值能耗由1.276t标准煤下降到1.077t标准煤,累计下降15.61%;单位工业增加值能耗由2.59t标准煤下降到2.043t标准煤,累计下降21.1%。我国“十一五”期间克服诸多困难,尽最大努力实现了国民经济和社会发展第十一个五年规划提出的单位国内生产总值能源消耗降低20%左右的约束性目标,减缓温室气体排放增长^[8]。

近年来,我国经济发展保持了10%左右的增长,但是与此同时人均能源消耗量也保持了6%~7%的高速增长。可以预见,我国以煤为主的能源结构短时间内无法改变,经济还将持续稳定的发展,加之我国的城市化建设进入了快速发展阶段,社会总能耗和人均能耗将持续走高,这些必将使我国面临更为严峻的能源、环境和温室气体控制压力。在这种形势下,迫切要求工程热物理与能源利用

学科为能源开发和利用提供新的科学理论基础和技术先导,并以前所未有的科学技术观念为其服务,也为学科的崭新发展注入新的动力,开拓出不断创新的研究课题和领域。

1.2.2 能源结构优化、推进节能减排的必然趋势

新中国成立后的经济建设初期,国家独立自主、自力更生地构架了我国独立的社会主义工业体系,发展生产,满足自给自足的基本要求,随后围绕国家工业化进行建设和发展;改革开放三十余年,全国上下贯彻“发展才是硬道理、建设小康水平社会主义国家”的精神,持续快速地发展经济,然而产业架构还是以技术水平低、资源消耗高、生产粗放型为主要特点;最近十几年虽然加快推动科学技术进步,大力调整了产业结构,力求降低能源消耗,着手治理浪费,厉行节约,能源利用率有所提高,但即便是在如此形势下,我国能源消耗强度仍然偏高。2010年我国单位GDP的能耗(能源强度)是美国的3倍、日本的5倍。目前,我国的总体能源利用效率为33%左右,比发达国家低约10个百分点。因此,对我国而言,立足于环境友善、资源节约、和谐发展的新兴工业化道路,提高科学技术水平、增大高科技含量、采用先进生产工艺和技术装备已经迫在眉睫,势必要求和推动工程热物理与能源利用学科把握这新的发展机遇,既要增强学科基础、拓展内涵、扩大服务领域,又要注重发展先进实用和前瞻性高的新技术。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》指出,要经过15年的努力在能源开发、节能技术和清洁能源技术上取得突破,促进能源结构优化,主要工业产品单位能耗指标达到或接近世界先进水平^[9]。

能源动力行业继向高参数,甚至超高参数方向发展后,正持续朝集成、高效、洁净和智能化趋势迈进,包括循环流化床燃烧发电(CFBC)、增压流化床燃烧联合循环发电(PFBC-CC)、整体煤气化联合循环发电(IGCC)、燃煤联合循环(CFCC)、湿空气透平循环、新型核能联合循环、化学链燃烧反应动力系统(CLSAS)等,都是以人们难以预料的速度涌现并逐步实用化。与此同时,为满足社会经济更为广阔的能源需求,燃煤燃料电池电站技术,先进核反应堆,基于新型能质转换和能量释放机理的多功能能源集成系统,诸如太阳能、地热能、风能、生物质能等可再生能源的利用,均以崭新的面貌展示在人们眼前。

动力推进与民用交通运输高效、安全的迫切需要,海陆空低耗高效、精准快速、高推重比的现代军事目标,探求世界起源和宇宙奥秘的航天渴望等,都对高效洁净燃烧、能源转换、热流体力学、新兴推进技术、新兴和微型能源系统、先进强化冷却技术与有效热防护、系统热管理等提出前所未有的新挑战。

我国还存有60万台工业锅炉,以及难以计数的小锅炉和工业窑炉,轻工纺

织、食品、医药、冶金、建材、化工与石油化工等高耗能的传统工业，这些都亟待依靠技术革新来解决节能降耗的问题。因此，我国实现能源的合理、高效、洁净转化和利用的压力极大，面临的问题和解决问题的技术途径也异常复杂。这些问题不仅量大面广、要求的技术难度大，还要求成本低廉、实用有效。

我国建筑耗能问题也十分突出，不仅单位建筑能耗比同等气候条件国家高出2~3倍，而且建筑直接能耗已占社会总能耗的30%，随着生活水准的提高和人们对居住条件、室内环境舒适、健康、品味等方面的追求，这一比例会增至35%左右，将成为能耗第一大户。建筑节能与保温绝热材料、通风供冷采暖、空调制冷与低温工程等，都期待着新的思维观念、新的基础理论和新的技术方法。

目前，除以上所述的行业和技术领域外，在社会生产力全面提升的今天，对能源转换和利用技术推进和更新的渴求几乎无所不在，这些都是本学科传统和不断创新的研究领域。

1.2.3 资源和生态安全的双重压力

中国能源生产、资源消耗总量在世界上均可名列前茅，能源消耗结构以煤为主，占到64%左右。人均能源消耗量只有发达国家的10%~15%，而且如前所述单位产值的能耗远高于世界平均水平，要改变我国目前人均GDP很低的现状，在过去持续30多年的高增长后，仍必须继续保持每年都有较高增幅。显然，无论如何强调和做到高效节约，高速度地增加开发能源生产仍是必然的，这样才能提供足够的能源以持续发展经济。应对人口众多、高消耗低效率的快速经济增长，能源资源突显其苍白无力，如此负荷的能源开发也不可避免地消耗和占用其他资源，加上结构性的先天缺陷，能源和资源的匮乏已然演化成一个国家的资源安全问题，构成对国家社会、经济和政治安定的巨大威胁。国家资源安全问题是世界各国作为战略考虑的重大问题之一^[10]。

与我国能源结构特点、需求、转化利用落后现状相对应的是环境污染问题，犹如雪上加霜，严重制约社会、经济发展，危及我们的健康和生存环境，甚至威胁生态资源的长期安全。以燃煤为主的能源动力系统、大量的工业炉和窑炉，在实施能源转化和利用中成为产生大气酸雨、 NO_x 、 CO_2 、飘尘等污染的源头；发动机等则是城市环境的主要杀手之一，排放污染气体和颗粒，产生大量噪声；大量的工业余热被浪费，变成热污染源；改善生活水准、提供生活方便的低温制冷与空调等所用氯氟烃能量转换介质，是破坏臭氧层的罪魁祸首等，这些严峻考验和问题的解决都与工程热物理和能源利用各个分支学科领域密切相关。

现今能源开发、储运、转换利用和各类末端使用可能引发潜在安全问题，研究防灾、灭灾、减灾，必须了解和掌握能量释放、形态转换、过程演化、传播传

递等规律和条件,要从热力学、传热传质、燃烧、多相流体流动等方面进行理解和描述,这些都是本学科责无旁贷的研究任务和大有可为的广阔天地。应该注意到,资源和环境安全的双重压力更增添了学科发展的崭新内涵。

1.2.4 高新科学技术的推动促进

无论从学科的起源、兴起和发展,还是从学科的创立与建设的历程来看,工程热物理与能源利用学科都与科学技术最前端和社会生产最活跃的领域密切相关,尤其是过去的数十年基本保持和现代高新科学技术同步共进,相互融合交叉、相互促进协调,携手持续地创造着一个又一个科学技术奇迹。纵览当今世界社会经济和科学技术发展的三大主导科技——生物、信息和纳米科技,无一不与本学科有着千丝万缕的内在依托。这些高新科学技术不断为工程热物理与能源利用学科研究提供新的认知思想、科学理念、技术手段和发展需求,同时工程热物理与能源利用学科也在这些高科技进步的前端辅以新的技术理论和途径、在实际应用中给予有力的技术支撑。

近年来,先进的科学理念和基础科学的最新进展极大地带动了科学和技术的进步,人们开始从以热机为源头的工程热物理与能源利用学科范畴突破,引进了新的能质转换思维,发展了新的基础理论,如基于新型能质转换和能量释放机理的能源循环与系统理论;更是拓展衍生出众多前沿热点领域与方向,如微纳米热物理、生物与生命热物理、生态与环境安全热物理、微细能源系统和原理等。这些为适应未来趋向而展开的深层次原理创新,也越来越多地涉及自然世界能质相互作用与转化的基本内涵和基本规律。

1.2.5 培育和发展战略性新兴产业的重要科技保障

在淘汰落后生产力的同时,我国把大力培育和发展战略性新兴产业作为优化产业结构的突破口,不断加大对战略性新兴产业技术研发和产业化的支持力度。2010年10月,国务院发布了《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》,提出现阶段重点培育和发展节能环保、新一代信息技术、生物、高端装备制造、新能源、新材料、新能源汽车等新兴产业,并明确了今后一个时期的发展目标和政策导向^[11]。2009年以来,我国还启动了新兴产业创业投资计划,设立了18支创业投资基金,支持节能环保、新能源领域的创新型企业成长,选择部分城市建立低碳新能源产业园区,推广使用节能和新能源产品。可见,节能环保与新能源产业作为国家战略性新兴产业,在国家能源与环境战略中的地位越来越重要。

太阳能热利用,地热资源开发,风力发电以及秸秆转换、燃烧等新能源技术是工程热物理与能源利用学科当前最活跃的研究领域之一,推动着可再生能源产

业的快速发展,在国际上已经产生了重要影响。截至2009年年底,全国太阳能光热应用面积为11.79亿 m^2 ,浅层地能应用面积为1.39亿 m^2 ,比2008年分别增长14.2%和35.4%。太阳能热水器集热面积为1.45亿 m^2 ,产量和使用量稳居世界首位,每年约替代标准煤2900万t。中国风电项目也发展迅速,2005~2009年,风电装机容量连续5年实现100%以上增长;截至2009年年底,风电装机容量为2580万kW,仅2009年新增装机就超过了1300万kW;2010年全球每三台新装风电机组就有一台在中国;目前,总装机已突破3000万kW,提前10年完成此前规划的2020年风电发展目标。如今,中国正在建设7个“千万千瓦级”风电基地,并开展了沿海首批海上风电场特许权招标。2010年上海东海大桥10万kW海上风电项目并网发电,总装机容量102MW,预计未来年发电量可达2.6亿度,相当于每年替代约8.3万t标准煤燃烧,减少二氧化碳排放约21万t,成为欧洲之后亚洲的第一个海上风电场。我国是农业大国,生物质能开发利用对广大农村有重要意义。我国对生物燃料乙醇开发、秸秆能源化利用、生物能源等技术均制定了相应的鼓励政策。2009年中央政府投资50亿元,2010年又安排52亿元,用于支持建设户用沼气、乡村服务网点、养殖小区和联户沼气、大中型沼气工程。到2010年年底,全国户用沼气将达到4000万户,小型沼气6.5万处,大中型沼气4700处。据测算,4000万户户用沼气年均可替代薪柴和秸秆4800万t,相当于1.32亿亩^①林地;年产沼气154亿 m^3 ,可替代1100万t标准煤,减少二氧化碳排放2800多万t。

节能环保和新能源产业的发展,势必要求和推动工程热物理和能源利用学科把握这些新的发展机遇,既要增强学科基础、拓展内涵、扩大服务领域,还要注重发展先进实用和前瞻性高的新技术。

1.2.6 国家创新体系建设和基础研究发展的需求

科学技术是第一生产力,是先进生产力的集中体现和主要标志。进入21世纪,新科技革命迅猛发展,正孕育着新的重大突破,将深刻地改变经济和社会的面貌。信息科学和技术发展方兴未艾,依然是经济持续增长的主导力量;生命科学和生物技术迅猛发展,将为改善和提高人类生活质量发挥关键作用;能源科学和技术重新升温,为解决世界性的能源与环境问题开辟新的途径;纳米科学和技术新突破接踵而至,将带来深刻的技术革命。基础研究的重大突破为技术和经济发展展现了新的前景。科学技术应用转化的速度不断加快,造就了新的追赶和跨

^① 1亩=666.7 m^2 ,下同。

越机会。因此,我们要站在时代的前列,以世界眼光,迎接新科技革命带来的机遇和挑战。纵观全球,许多国家都把强化科技创新作为国家战略,把科技投资作为战略性投资,大幅度增加科技投入,并超前部署和发展前沿技术及战略产业,实施重大科技计划,着力增强国家创新能力和国际竞争力。面对国际新形势,我们必须增强责任感和紧迫感,更加自觉、更加坚定地把科技进步作为经济社会发展的首要推动力量,把提高自主创新能力作为调整经济结构、转变增长方式、提高国家竞争力的中心环节,把建设创新型国家作为面向未来的重大战略选择。

基础研究以深刻认识自然现象、揭示自然规律,获取新知识、新原理、新方法和培养高素质创新人才等为基本使命,是高新技术发展的重要源泉,是培育创新人才的摇篮,是建设先进文化的基础,是未来科学和技术发展的内在动力。基础研究的原始创新是形成高新技术和自主创新能力的物质基础,在国家创新体系所涵括的各大系统中,以知识创新为主要标志的基础研究对于服务于国家目标的核心竞争力的构建具有全局性的战略意义。胡锦涛总书记指出:“基础研究是科技进步的先导,是自主创新的源泉。只有以深入的基础研究作后盾,才能不断提高原始创新能力,增强国家发展的后劲。我们不仅要大力加强应用研究,而且要高度重视基础研究。”

在科技发展日新月异的今天,以基础研究及其所孕育的高新技术的原始性创新为主要标志的科技自主创新能力的竞争,已成为世界科技竞争的制高点,乃至国家竞争成败的分水岭。而现行知识产权保护制度和高新技术领域“胜者全得”的竞争模式,以及发达国家与发展中国家所掌握的核心科技资源的不均衡性要远大于其经济发展的不均衡性、甚至还在继续扩大的现实,决定了我们这样的一个大国,在21世纪愈演愈烈的综合国力竞争中,必须实行以大力提升自主创新能力为主导的跨越式发展的战略。发展基础研究要坚持服务国家目标与鼓励自由探索相结合,遵循科学发展的规律,重视科学家的探索精神,突出科学的长远价值,稳定支持,超前部署,并根据科学发展的新动向,进行动态调整。

许多国家已经把加强全球化背景下的国家创新体系建设摆在关系国家生存与发展的重要战略地位。美国自20世纪80年代以来就不断在强化国家创新体系建设,这不但使其大大缓解了90年代初整个西方世界的经济大衰退和随后亚洲金融危机的冲击,而且还创造了持续十余年长盛不衰的所谓美国新经济奇迹。欧盟在创新体系建设中,突出信息和生物领域的核心竞争技术,强调高新技术与传统产业的结合和欧盟各国间的创新合作,出台了一系列与之相适应的重大政策。韩国、日本等也都结合本国国情和未来竞争地位,优化强化了创新系统。

世界经济论坛发布了《2010—2011年全球竞争力报告》。在大型发展中经济

体中,中国继续领先,排名上升2位至第27名。其中反映创新竞争力的因素列26位,尚落后于发达国家,与中国经济总量在世界上排名第二的地位极不相称。这从一个侧面指出,我国在经济的快速发展中,决不可忽视技术瓶颈和原创能力不足对国力的持续稳定增长所构成的致命隐患,同时更进一步说明加强国家创新体系和自主创新能力建设的极端重要性和紧迫性。胡锦涛指出:“要坚持把推动自主创新摆在全部科技工作的突出位置,大力增强科技创新能力,大力增强核心竞争力,在实践中走出一条具有中国特色的科技创新的路子。要瞄准世界科技发展的前沿,加快国家创新体系建设,加强原始创新能力和集成创新能力。”

从总体上看,我国能源利用科学的研究水平与世界先进水平还有较大差距,特别是实验研究方面差距更大,能源科技开发研究投资强度过低,重应用、轻基础的倾向长期存在,试验设备和测试手段落后,许多重要方向性研究还处于空白或薄弱状态。因此,还需要工程热物理与能源利用领域的科学家在基础研究方面不断努力,在自由探索中最大限度地发挥自由想象力、本质直观能力和假说推演能力,提高原创性能力。工程热物理与能源利用学科也将进一步重视并争取更多的资源来资助该领域科学家,结合国家需求和探索自然规律的双重目的进行自由探索,为中国的国家经济社会发展和国家安全做出贡献,并紧跟国际学术前沿,占领更多的学术制高点,在国际学术领域占有一席之地,同时培养出更强的基础研究人才队伍。

1.3 学科体系

1.3.1 学科分支

工程热物理与能源利用学科内涵丰富,外延广阔,近年来更是和现代高新科学技术相互融合交叉、相互促进协调,创造衍生出众多前沿热点领域与方向,学科间的界限越来越淡化和模糊,学科内部分支的传统区分已逐步失去意义,考虑侧重点和具体对象的差异仍可做一参考概括性区分,具体包括工程热力学、内流流体力学、传热传质学、燃烧学、多相流、可再生能源利用等若干个分支学科。毫无疑问,会有很多方向和前沿领域跨越在这几个分支之间,或者涵盖其中多个分支范畴的部分内容。无论如何区分,工程热物理与能源利用学科内部的各个分支和新兴方向领域,都是紧密联系,相互依存,相互配合,相互促进,有所侧重地发挥着学科的战略作用。

1.3.2 内涵与作用

1. 工程热力学

工程热力学是工程热物理学的基础和主要分支,许多能源科学与热物理学基本概念、定义和反映热过程本质的规律都在此奠定。其主要研究方向包括基础热力学、热物性学、热力循环与总能系统、制冷与低温工程学、热力系统动态学、学科交叉领域等。工程热力学已经渗透到各种科学和技术领域,并形成许多新的分支学科,主要研究对象仍是能源与动力领域热能转换为机械能的规律和方法以及更有效地将热能转变为功的途径。面向可持续发展的绿色能源战略的背景,与环境、化工等领域交叉,拓展为新的学科方向。或者说,工程热力学为从战略角度考虑能源利用和环境问题,提供了基础理论和方法。

2. 内流流体力学

内流流体力学研究各种实现能源转换和利用的动力机械和设备内部流体流动的规律,并提供计算原理设计和方法。其传统内涵主要重视叶轮机械内部流动、推进系统气动热力学等宏观问题,现已拓展到微器械、微通道的流动问题,甚至还涵盖与工程热物理有关的生物流体力学等方面,大量先进测量和流场显示技术揭示复杂流动机理,计算上从广泛使用无黏模型到普遍采用有黏模型,从定常流动模拟到三维非定常模拟转变。研究目标从只注重揭示内流流动机理到重视与广泛渗透的微电子技术相结合,发展各种内流流动的主/被动控制技术。随着内流实验技术、数值模拟技术发展以及与其他学科的交叉和不断融合,内流流体力学已取得长足发展,但更好地解决各种内流问题仍须深刻理解内流流体力学应用背景、深刻认识基本问题的物理机制并开展不断深入的理论和实验探索。

3. 传热传质学

传热传质学研究由于温度差所引起的能量传递过程,以及因物质组分浓度差异而伴随发生的物质迁移现象。传热传质学以导热(质扩散)、对流换热和辐射换热为传递过程的基本形式及建立经典理论框架的基本内涵,加上基本形式的耦合及其与各种基本原理和应用深层交叉融合衍生的传递现象,构成了其基本的学科体系。物质多样性与不均匀性、温度和浓度差异是自然世界的本源和生命的原动力。热质传递过程正是物质运动的一种普遍形式,有着无所不在的广泛实际应用背景,尤其是与现代产业和高科技发展形成紧密交叉,在许多相关学科和高科技领域,诸如新兴能源系统、航空航天、生物与医学工程、生态环境、功能与

新材料、微纳米科技、光电子、军事技术、现代光机电加工等中,扮演着独特的重要角色,甚至起着关键性作用。

4. 燃烧学

燃烧学是研究着火、熄火、燃烧过程和机理的学科。燃烧是指燃料与氧化剂发生强烈化学反应,并伴有发光、发热的现象,是化学反应、流动、传热和传质并存、相互作用的复杂物理化学现象。燃烧学是工程热物理与能源利用学科的一个内容丰富、实用性很强的分支,其研究包括燃烧过程热力学,反应动力学,着火和熄火理论,预混气体流动燃烧,气、液和固体燃料燃烧,液滴和煤粒燃烧,液雾、煤粉和流化床燃烧,发动机燃烧,推进剂燃烧,超音速燃烧,爆震燃烧,边界层和射流中的燃烧,湍流和两相燃烧的数学模型,火灾以及燃烧诊断等。燃烧学的进一步发展将与湍流理论、多相流体力学、辐射传热学、燃料的合成与制备、复杂反应的化学动力学等学科的发展相互渗透、相互促进。

5. 多相流

多相流研究具有两种以上不同相态或不同组分物质共存并有明确分界面的多相流体流体力学、热力学、传热传质学、燃烧学、化学反应和生物反应以及相关工业过程中的普遍科学问题,是一门从传统能源转化与利用领域逐渐发展起来的新兴交叉科学,是能源、动力、核反应堆、化工、石油、制冷、低温、可再生能源开发利用、航空航天、环境保护、生命科学等许多领域实现现代化的重要理论和关键技术基础,在国民经济的基础与支柱产业发展中起着独具性角色的巨大作用。多相流科学集中体现了复杂运动、变化与相互作用的特点,无论在微观、介观还是宏观层面,多相流相场空间结构与相浓度分布的不均匀性、状态的多值性、过程的不可逆性,以及相间相互作用和相界面的动力学行为都是物质世界普遍的物理、化学本质及其在典型或特殊环境下的具体表现。

6. 可再生能源

可再生能源主要是指太阳能、风能、生物质能、地热、海洋能等资源丰富的,且可循环往复使用的一类能源资源,其转化利用具有涉及领域广、研究对象复杂多变、交叉学科门类多、学科集成度高等特点^[12,13]。在可再生能源工程领域中,工程热物理与能源利用学科主要研究可再生能源利用过程中能量和物质转化与传递原理及规律,以及相关热物理问题。可再生能源利用形式多样,涉及工程热物理与能源利用各个分支学科,且具有多学科交叉与耦合的特点。工程热物理与能源利用学科相关分支学科的发展,将为可再生能源利用技术的研究和发展提供有

力的保障,而可再生能源利用的研究又不断为工程热物理与能源利用学科提出新的研究方向和发展目标,促进工程热物理与能源利用学科的发展。

1.4 基金资助现状

国家自然科学基金是资助自然科学基础研究的主要渠道,在国家科技创新体系的定位明确为“支持基础研究、坚持自由探索、发挥导向作用”。围绕国家目标和科学发展趋势,遵循基础研究规律,大力支持科学家的自由探索和为解决国家战略需求的自主创新,在出成果、出人才等方面取得了良好成效。自1986年国家自然科学基金委员会成立以来,工程热物理与能源利用学科已经择优资助了面上项目2510项(其中自由申请项目1784项,青年科学基金项目689项,地区基金项目37项)、重点项目94项、重大项目4项、国家杰出青年科学基金项目35项、海外及港澳青年合作基金项目10项、创新群体科学基金项目2项、国际合作重大项目4项,以及一批相关的国际合作项目,总资助经费约为7.9亿元。

1.4.1 面上项目

面上项目(含青年科学基金项目和地区基金项目)作为国家自然科学基金最基本的资助类别,对学科的整体、均衡发展有着十分重要的意义。面上项目资助经费占基金项目总经费的60%以上,资助对象为全国各部门、各地区、各单位的科技人员。它不仅维持了工程热物理与能源利用学科的基础研究方向,激励了学科研究人员创新潜力的发挥,还为培养和造就学科青年人才、形成基础性后备力量发挥了重要作用。同时,也为工程热物理与能源利用学科基金重点、重大项目的立项,以及国家其他部门重要研究项目的立项提供了研究队伍和研究基础。工程热物理与能源利用学科的国家杰出青年基金获得者绝大部分承担过面上项目,学科所立的重点、重大项目承担者都曾获得过相关面上项目的资助。自国家自然科学基金委员会成立以来,面上项目的资助情况已经得到了很大发展。1986年,学科共资助面上项目64项,平均资助强度仅为3.42万元/项;“七五”期间,平均资助强度为4万元/项;“八五”期间,平均资助强度为7万元/项;“九五”期间,平均资助强度为10万元/项。进入新世纪以来,自然科学基金快速发展,资助强度连年提高。“十五”期间,平均资助强度为23万元/项;“十一五”期间,平均资助强度达33万元/项。随着我国综合国力和科学技术水平的不断提高,面上项目的资助项目数和资助强度都将进一步增加,这将对工程热物理学科的基础性研究水平的提高和人才培养起到更大的促进作用。

表1.1~表1.4为工程热物理与能源利用学科面上项目资助的详细情况。

表 1.1 2001 ~ 2010 年面上项目资助项目数 (单位: 项)

年度	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年
自由申请	52	72	76	91	107	113	103	120	130	173
青年基金	16	25	26	28	32	38	58	86	103	131
地区	2	0	0	1	1	1	2	3	4	8

表 1.2 2001 ~ 2010 年面上项目资助经费强度 (万元) 及资助率

年度	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年
自由申请 /万元	20.7	22.7	23.5	22.1	25.2	27.4	31.8	34.6	36.0	37.4
资助率/%	16.77	18.75	18.91	18.76	19.24	17.15	14.95	16.37	15.59	19.35
青年基金 /万元	16.6	18.4	19.6	22.8	22.6	23.2	20.0	20.6	20.0	20.1
资助率/%	22.67	35.14	22.69	21.88	18.60	18.10	19.80	25.52	25.37	25.49

表 1.3 1986 ~ 2010 年面上项目资助单位分布情况 (前 15 位) (单位: 项)

学科分类 项目依托单位	工程热 力学	内流流 体力学	传热 传质学	燃烧学	多相 流热 物理学	热物性 与热物 理测试 技术	可再生 能源	工程热 物理与 其他领 域交叉	合计
西安交通大学	34	36	25	33	51	17	7	1	204
清华大学	19	24	46	46	21	21	7	17	201
上海交通大学	43	16	13	32	17	2	12	8	143
华中科技大学	8	5	16	65	10	9	8	11	132
中国科学院工程热物理研究所	18	41	25	22	9	3	6	8	132
浙江大学	21	5	6	41	12	11	13	6	115
天津大学	20	3	9	61	8	9	4	2	116
北京航空航天大学	3	54	16	9	1	3	2	3	91
中国科学技术大学	5	6	6	43	0	12	5	8	85
哈尔滨工业大学	16	15	26	10	4	0	2	1	74
东南大学	14	1	17	19	10	4	6	1	72
大连理工大学	5	3	13	17	6	2	9	1	56
上海理工大学	1	8	23	3	5	9	3	10	62
重庆大学	23	0	15	3	2	0	8	2	53
中国科学院广州能源研究所	6	1	4	7	2	0	26	2	48

表 1.4 2001 ~ 2010 年面上项目资助学科分布情况

学科分支	工程 热力学	内流 流体力学	传热 传质学	燃烧学	多相流 热物理学	热物性 与热物理 测试技术	可再生 能源	工程热物 理与其他 领域交叉
资助项目数/项	164	110	181	285	97	46	93	61
比例/%	15.81	10.60	17.45	27.48	9.35	4.44	8.97	5.88

1.4.2 重大项目和重点项目

1. 重大项目

重大项目是国家自然科学基金研究项目系列的一个重要类型。重大项目要瞄准国家目标,把握世界科学前沿,根据国家经济、社会、科技发展的需要,重点选择具有战略意义的重大科学问题,组织学科交叉研究和多学科综合研究,进一步提升源头创新能力。

主要资助方向为:①科学发展中具有战略意义,我国具有优势,可望取得重大突破,达到或接近国际先进水平的前沿性基础研究;②国家经济发展亟待解决的重大科学问题,对开拓发展高新技术产业具有重要影响或有重大应用前景的基础研究;③围绕国家可持续发展战略目标或为国家宏观决策提供依据的重要基础性研究,以及具有广泛深远影响的科学数据积累等基础性工作;④基金面上、重点项目多年资助基础上凝练出来的、需加大资助力度可望取得重大突破的重大科学问题。

国家自然科学基金委员会“九五”和“十五”期间在本学科设置了两个重大项目:“航天技术和信息器件中的微细尺度传热”交叉重大项目与“能源动力中多相流热物理基础理论与技术研究”重大项目,“十一五”期间设立了“新型低温制冷技术中的基础问题”重大项目。以上三个重大项目简介如下:

1) 航天技术和信息器件中的微细尺度传热

20 世纪 80 年代,航天器的小型化和微电子器件的高集成度对散热提出了越来越高的要求。由于微尺度条件下的流动与传热具有不同于常规尺度的特点,国际传热界一直将微尺度传热作为当时的研究热点之一。鉴于学科发展和科技进步的需求对微细尺度传热研究的迫切要求,国家自然科学基金委员会于 1999 年设立了工程与材料科学部和信息科学部交叉的重大项目“航天技术和信息器件中的微细尺度传热”,以期揭示和总结微细尺度流动与传热的新的现象、特点和规律,研究新型微电子器件的自热特点和热电耦合分析方法以及新型微传感器的热优化

分析和设计方法。

经过5年的研究,该项目取得了丰硕的成果:系统、深入地研究了单相微细尺度流动与传热的尺度效应及其物理机制,揭示了微尺度单相流动与传热的尺度效应及其物理机制;研究了微通道与微结构内的传热传质机理和微尺度导热和辐射特性;在进行基础研究的同时,充分利用学科交叉的优势,开发了微热板式阵列气体传感器、微型热扫描量热卡计、绝缘体上硅 MOSFET 器件(DSOI)、微测辐射热计、气体微惯性器件、液滴振荡型微 PCR 芯片等一系列新型微器件和微传感器。在微细尺度传热领域所取得的理论研究以及在微器件和微传感器方面取得的技术创新成果,总体上处于国际先进水平,在国际上产生了重要影响,为推动微细尺度传热的学科发展和我国在相关领域的科技进步发挥了重要作用。

2) 能源动力中多相流热物理基础理论与技术研究

多相流热物理学研究能源领域及动力、石油等工程中的多相流动及其传热传质过程规律,是开发高效、洁净、可靠的火电和核电、发展新型能源动力系统,实现石油天然气的高效开采和储运等过程中的关键科学问题之一。

针对人类21世纪所面临的能源与环保问题的重要需求,国家自然科学基金委员会于1999年设立了重大项目“能源动力中多相流热物理基础理论与技术研究”,以我国能源动力工业发展中亟待研究的多相流热物理基础理论与技术为总目标,集中力量重点研究具有普遍价值的非线性多相流相界面动力学及能质机理与数理模型,大型火电核电设备中高温高压高热负荷瞬态汽液两相流与安全传热规律、高温气固两相流动理论与技术,石油天然气高效钻采与混输中多组分多相流,以期形成完整系统的多相流学科新体系。

经过5年的研究,该项目也取得了丰硕的成果:在自然循环过冷沸腾及多维汽液两相流动与传热规律研究方面提出了自然循环过冷沸腾净蒸汽产生点、过冷沸腾空泡率和两相流动不稳定性等计算模型和计算方法,针对多维汽液两相流发展了漂移数学模型;在非线性多相流相界面动力学及能质传输机理与数理模型研究方面发展了流型的多压力压差传感器数据融合识别理论和技术;对螺旋管内强制对流沸腾两相流与传热特性、离散相颗粒及颗粒群在不同流动条件下的运动规律和相界面几何特性、稳态和瞬态气液两相流相界面微观结构、新数理模型研究及下降液膜相界面形貌等学术前沿领域开展了创新性的研究工作,得到国际知名学者高度评价;研究了高温高压高热负荷汽液两相流与安全传热规律,发展了油气混输中的多组分多相流理论及测试技术。研究工作与国民经济紧密结合,部分成果已获得应用,对国民经济的发展发挥了重要指导作用。该项目所取得的学术成果使我国在非线性多相流相界面动力学与能质传输、油气水多相流管理论与测量及除砂技术、高参数汽液两相流与安全传热等研究领域总体上达到国际先进

水平, 为推动我国能源动力、石油等工业的科技进步发挥了重要作用。

3) 新型低温制冷技术中的基础问题

制冷与低温技术在促进国民经济建设、国防军事现代化以及推动科学技术发展中扮演着极其重要的角色。近年来, 交变流动制冷 (热声、脉冲管)、热驱动制冷以及混合工质制冷等新型低温制冷方法得到了迅速发展, 它们普遍具有可靠性高、环保、高效以及可利用余热、太阳能等可再生能源的突出优点或者发展潜力, 成为当前国际制冷领域的研究前沿和发展重点。对它们的深入研究必将推动制冷与低温技术的重大革新, 并在节能环保、清洁能源、信息技术 (超导、红外等)、生物医学工程等涉及国计民生、高新技术国家安全领域获得重要应用。

根据国家当前在节能环保、高新技术、国家安全等方面的迫切需求, 以及国际低温制冷技术研究领域的发展趋势, 2008 年国家自然科学基金委员会设立“新型低温制冷方法的基础研究”重大项目, 旨在瞄准国际发展前沿, 围绕新型低温制冷技术中的重要科学问题, 开展新型低温制冷系统在动态、复杂流动、多场耦合情况下的能量转换与传热传质机理研究, 目的在于增强我国在制冷与低温技术研究领域的源头创新能力, 使我国继续在相关领域处于国际前列, 并为推动新型低温制冷技术在国民经济建设、高新技术和国家安全方面获得应用奠定基础。该重大项目目前进展顺利, 已通过中期考核, 取得了一系列创新性研究成果。

表 1.5 给出了工程热物理与能源利用学科自 1987 年以来已资助的重大项目清单。

表 1.5 工程热物理与能源利用学科已资助重大项目

项目名称	批准金额/万元	起止年限
工程热物理中关键性问题的研究	300	1987. 02 ~ 1992. 12
能源动力中多相流热物理基础理论与技术研究	500	1999. 02 ~ 2003. 12
航天技术和信息器件中的微细尺度传热	500	1999. 06 ~ 2003. 06
新型低温制冷技术中的基础问题	1000	2009. 01 ~ 2012. 12

2. 重点项目

重点项目是国家自然科学基金研究项目系列的一个重要类型。重点项目支持科技工作者结合国家需求, 把握世界科学前沿针对我国已有较好基础和积累的重要研究领域或新学科生长点开展深入、系统的创新性研究工作, 特别是: ①对学科发展有重要推动作用的关键科学问题和科学前沿的研究; ②对经济与社会可持

续发展有重要应用前景和意义或能够充分发挥我国资源或自然条件特色的基础研究。重点项目研究领域主要来源包括：①国家自然科学基金委员会学科发展战略和优先资助领域；②已获得重要进展，经过进一步提炼与加大支持力度可望取得突破性进展的科学基金面上项目；③科技工作者和有关机构根据科学技术发展趋势和国内具备的工作基础提出的建议。

“十五”和“十一五”10年期间，国家自然科学基金的资助规模和资助强度都有了显著的增加，共资助了68项重点项目（见附录1）。“十五”期间学科共资助了25项重点项目（包括2项福特基金重点项目和3项“西部能源”重大研究计划的重点项目）；“十一五”期间学科共资助了43项重点项目（包括3项学部可再生能源重点项目群的重点项目、1项“西部能源”重大研究计划的重点项目、1项科学仪器基础研究基金重点项目和5项广东联合基金重点项目）。资助项目涉及所有的工程热物理与能源利用学科分支领域，既有能源利用中涉及的一些深层次的机理性、基础性问题，也有紧密结合国家需求且又从实际工程背景中提炼出科学问题而安排的重点项目。

表1.6和表1.7是工程热物理与能源利用学科2001～2010年重点项目的资助情况。

表 1.6 2001～2010 年重点项目资助项目数

年度	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年
项目数/项	6	4	5	5	5	7	8	7	11	10

表 1.7 2001～2010 年重点项目资助领域分布

获资助重点项目领域分布		资助项目数/项	比例/%	总计/项
学科代码	学科			
E0601	工程热力学	6	8.82	68
E0602	内流流体力学	5	7.35	
E0603	传热传质学	19	27.94	
E0604	燃烧学	13	19.11	
E0605	多相流热物理学	4	5.88	
E0606	热物性与热物理测试技术	6	8.82	
E0607	可再生能源	9	13.25	
E0608	工程热物理与其他领域交叉	6	8.82	

在学科资助的支持下,有些重点项目在科学家的不懈努力下,已经取得了重要的原创性研究成果,例如:

浙江大学承担的国家自然科学基金重点项目“气固两相湍流拟序结构的直接数值模拟和实验研究”(50236030),发展和完善了拟谱方法、谱元方法以及高精度紧致差分方法和内嵌边界方法等气固两相湍流运动的直接数值模拟方法,对气固两相三维混合层流动、气固两相三维湍流射流、气固两相三维湍流绕流等进行了详细的直接数值模拟研究,揭示了这些流动中湍流拟序结构的特征,湍流涡团的生成、发展和耗散演化过程,以及气固两相间湍流拟序结构的相互作用机理;定量地给出了不同尺寸的颗粒在湍流运动中的湍流扩散程度,发现了颗粒湍流扩散和分布与流场涡结构和压力分布之间的相关性。

中国科学院工程热物理研究所承担的国家自然科学基金重点项目“适合西部的多功能能源系统”(90210032),构建了燃料品位梯级利用的基本关联方程,阐明了多功能系统中燃料化学能与物理能的综合梯级利用原理和转换利用规律;研制了中低温太阳能与清洁替代燃料热化学反应试验台,并实验验证了燃料化学能梯级利用和太阳热能品位提升的能量释放机理和品位合理匹配的机制;提出了具有自主知识产权的太阳能-替代燃料热化学互补和煤-天然气综合互补的多功能能源动力系统;针对西部地区能源特点,提出了能源开发和利用的优化途径和系统方案。

哈尔滨工业大学承担的国家自然科学基金重点项目“特殊环境下的传热、传质、流动研究”(50336010),提出了等效灰体发射、吸收系数的概念及其反演方法;发展了基于辐射分配因子的反向蒙特卡罗法和粒子的辐射特性反演的智能微粒群算法;提出了多颗粒群、多光谱分辨率尺度处理和多尺度模拟、局域孤立域假象界面等效辐射温度和黑度的计算方法;研究了梯度折射率介质热辐射传递机理及特性,获得了热辐射在梯度折射率介质中的传输特征;研究了典型红外辐射传输计算方法的假散射和射线效应,提出了消除假散射和射线效应的措施;采用辐射传递方程的有限元/谱元法和无网格解法,提高了算法对辐射波峰面的捕捉能力和动边界的适应性;研究了层流等离子体射流的产生及向湍流射流转变的规律,数值模拟了流动和传热过程,验证了层流等离子体射流对电源的强波动特性以及载气供粉的强扰动性具有很强的抗扰动力。

南京理工大学承担的国家自然科学基金重点项目“功能流体流动和传热特性及其控制方法研究”(50436020),利用激光散斑法测量了纳米粒子运动特性,提出了计算纳米流体导热系数的理论公式,发展了一种基于格子-玻尔兹曼(Lattice-Boltzmann, LB)的纳米流体流动与能量传递的多尺度耦合方法,实验研究了

纳米流体沸腾换热特性,研究揭示了粒子微运动对纳米流体能量传递的强化机理;建立了外加磁场作用下磁性流体流动与能量传递的两相格子-玻尔兹曼模型,发展了温度敏感型锰锌铁氧体磁性纳米粒子的制备方法,探讨了基于温度敏感型磁流体热磁效应的能量传递与转化方法,研究揭示了外加磁场对磁性流体流动与能量传递过程的影响机制;建立了潜热型功能流体制备的调控方法,开展了潜热型功能流体流动与传热的理论与实验研究,研究揭示了微胶囊粒子及颗粒相变对潜热型功能流体能量传递的影响规律。

华中科技大学承担的国家自然科学基金重点项目“西部煤中矿物质及特有害污染组分在燃烧与转化过程中迁徙变化行为”(90410017),全面系统地研究了细微颗粒物的形成机理与痕量组分富集规律,揭示了西南煤中矿物质和重金属元素的赋存形态、迁徙演化规律及其相互作用机理;深入研究了煤中硫的分子结构特性及其转化过程中的变迁行为,为我国西南高灰、高硫煤利用过程中有害组分的减排提供了技术支撑;发展了细微颗粒群平衡随机过程的描述模型,对燃烧过程中细微颗粒物动力学演变行为规律进行了清晰的理论分析和定量描述,从而为燃烧过程中颗粒物生成演变和痕量元素富集的描述提供了一个通用的平台;提出了矿物组分和痕量元素的新型检测方法。该项目所发展的X射线衍射(XRD)全谱拟合精修晶体结构的方法,以及基于电感耦合等离子体技术的气相痕量元素的在线测量方法,是对煤中矿物组分定量分析和烟气中痕量重金属在线监测方面的拓展。

西安交通大学承担的国家自然科学基金重点项目“多相流相界面非线性动力学行为与数理化”(50536020),提出了基于界面波分歧和压力波失稳机理的气液两相流相界面行为预测模型和模拟方法,发展了新的描述两相流相界面动态变化特征的相界面浓度输运模型;建立了不可压缩、不相溶两相流界面运动模型,研究了剪切流场中大毛细数下液滴的变形及断裂,分析了液滴变形及断裂的特征时间和特征尺度;提出了气液界面的瞬态一维双流体模型、二维及三维的两相流相界面运动的扩散界面模型及数值求解方法,测量了床面气固两相流的颗粒群运动和颗粒分布特征,基于分子动力学理论建立了描述粗糙壁面动量交换的气固两相流颗粒动力学特征预测模型;发明了管内多相流的局部相含率和相界面浓度等界面特征参数的在线测量技术及装置系统(包括双平行电导探针相界面测量仪、单丝电容探针测量仪、多重电导电容探针组测量仪以及三相流相含率双螺旋电容探针),以及控制油气混输系统严重段塞流的技术。

上海交通大学承担的国家自然科学基金重点项目“微/纳尺度条件下的流体流动与传热传质研究”(50536010),对高热流密度条件下芯片微通道中流动沸腾非稳定现象的产生机制进行了研究,建立了沸腾流型图谱,提出了控制非稳定

沸腾的方法及稳定沸腾的传热模型, 阐明了微通道过冷沸腾过程中微泡喷射沸腾形成机理及流动换热特性; 研究了在脉冲加热条件下的微汽泡流动沸腾现象, 揭示了流速、热流密度和脉冲宽度及表面活性剂等参数对微加热器上的微汽泡沸腾流型、沸腾起始时间、成核温度的影响; 采用介观尺度格子-玻尔兹曼方法模拟了微孔隙尺度下 PEMFC 碳纸气体扩散层内单相及气液两相流动, 获得了微液滴在微隙结构中存在的条件和微液滴形貌及运动特性, 揭示了润湿特性分布对气体扩散层中气体和液态水传输的影响; 对直流电驱动微流控芯片中的焦耳热效应以及样品电堆积富集的动态过程进行了数值模拟, 提出了基于交流电热流效应的新型高效微混合器的设计方法, 并数值模拟验证了聚苯乙烯 (PS) 粒子的介电泳实验结果。

1.4.3 国家杰出青年科学基金项目和创新群体科学基金项目

国家杰出青年科学基金支持在基础研究方面已取得突出成绩的青年学者自主选择研究方向开展创新研究, 促进青年科学技术人才的成长, 吸引海外人才, 培养造就一批进入世界科技前沿的优秀学术带头人。同时, 为充分发挥海外及港澳科技资源优势, 吸引海外及港澳优秀人才为国 (内地) 服务, 国家自然科学基金委员会设立海外及港澳学者合作研究基金。国家杰出青年基金的设立是国家为加快培养优秀学术带头人、实施人才强国战略所采取的一项具有远见卓识的重大举措, 极大地鼓舞了海内外优秀青年学者献身祖国科研事业的热忱, 产生了重大而深远的影响, 它的实施对于稳定我国科研队伍、吸引海外高水平的人才回国工作、获得高水平科研成果、培养和造就优秀学术带头人都产生了显著的效果。2001 ~ 2010 年间, 学科共资助国家杰出青年科学基金 22 人、海外及港澳学者合作研究基金 7 人, 除热物性与热物理测试技术以外, 涵盖了所有分支学科领域。

表 1.8 ~ 表 1.10 为工程热物理与能源利用学科 2001 ~ 2010 年国家杰出青年科学基金项目的资助情况。

表 1.8 2001 ~ 2010 年国家杰出青年科学 (海外及港澳合作) 基金资助数 (单位: 项)

年度	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年
杰出青年基金	0	2	3	2	2	1	3	3	3	3
海外合作基金*	1	1	0	1	0	0	0	1	2	1

* 2006 年改为海外及港澳学者合作研究基金。

表 1.9 2001 ~ 2010 年国家杰出青年科学 (海外及港澳合作) 基金资助领域分布

获资助杰出青年科学基金项目领域分布		资助项目数/项	比例/%	总计/项
学科代码	学科			
E0601	工程热力学	8	27.59	29
E0602	内流流体力学	2	6.90	
E0603	传热传质学	6	20.69	
E0604	燃烧学	8	27.59	
E0605	多相流热物理学	1	3.45	
E0606	热物性与热物理测试技术	—	—	
E0607	可再生能源	1	3.45	
E0608	工程热物理与其他领域交叉	3	10.34	

表 1.10 2001 ~ 2010 年国家杰出青年科学 (海外及港澳合作) 基金资助依托单位分布

项目依托单位	资助项目数/项	比例/%
西安交通大学	5	17.24
上海交通大学	5	17.24
清华大学	3	10.34
华中科技大学	3	10.34
天津大学	2	6.90
中国科学院理化技术研究所	2	6.90
哈尔滨工业大学	2	6.90
浙江大学	2	6.90
上海理工大学	1	3.45
中国科学院广州能源研究所	1	3.45
重庆大学	1	3.45
中国科学技术大学	1	3.45
华北电力大学	1	3.45

为稳定地支持基础科学的前沿研究,培养和造就具有创新能力的人才和群体,国家自然科学基金委员会设立创新研究群体科学基金。创新研究群体科学基

金资助国内以优秀科学家为学术带头人、中青年科学家为骨干的研究群体,围绕某一重要研究方向在国内进行基础研究和应用基础研究。自该基金设立以来,学科一共支持了西安交通大学和华中科技大学 2 个创新研究群体科学基金项目,并且这两个项目均已成功滚动,获得第二期资助,见表 1.11。

表 1.11 2001 ~ 2010 年创新研究群体科学基金项目

项目名称	项目批准号	承担单位	起止年月
能源高效节约和可再生转化利用的多相流理论基础	50521604	西安交通大学	2006.01 ~ 2008.12
	50721005		2008.01 ~ 2010.12
燃煤排放物生成、控制与资源化利用的基础研究	50821064	华中科技大学	2009.01 ~ 2011.12
	51021065		2011.01 ~ 2013.12

1.5 基金支持原则

国家自然科学基金委员会陈宜瑜主任在基金委 2010 年六届三次全委会上指出:“‘十二五’乃至更长一段时期,是建设创新型国家、实现全面小康的攻坚期。要认清发展形势,把握发展机遇,审视基础研究多元化的资助格局,在坚持战略定位和工作方针、科学民主决策机制、依法管理、营造创新环境不动摇的基础上,把更加侧重基础、更加侧重前沿、更加侧重人才,作为今后一段时期科学基金发展的战略导向,不断增强服务创新型国家建设的能力”^[14]。

更加侧重基础,就是要不断夯实提升基础研究整体水平的学科基础。要在科学基金工作中重视基础学科或传统学科,加强薄弱学科或濒危学科,关注基本的数据积累和数据库建设工作,夯实基础研究的发展基础,防止出现“短板效应”,推进学科均衡协调可持续发展。

更加侧重前沿,是培育科技制高点、提升国家科技竞争力的必然要求,要前瞻部署和支持能够引领科技、经济、社会发展的科学前沿研究。要在统筹全面布局和重点部署的基础上推进学科交叉融合,发展新兴学科和学科的生长点;要在纷繁的研究热点中寻找科学的前沿,凝练和解决促进战略性新兴产业振兴的前沿科学问题,瞄准和抢占科技制高点;要关注高风险、高回报的变革性研究,捕捉创新机遇,及时有力资助,增强原始创新能力。

更加侧重人才,是实施人才强国战略、为自主创新提供智力支撑的必然要求。要打造培养创新人才和团队的资助链,要切实尊重创新人才成长和基础研究

队伍建设规律,坚持培养后备人才和激励科研一线人才相结合,稳定国内人才和吸引海外人才相结合,促进学术领军人才成长和培育创新团队相结合,完善人才培养资助体系和评价机制,形成贯穿科研职业生涯的科学基金人才链,促进建设一支规模宏大、结构合理、素质优良的科技队伍,为建设创新型国家提供强有力的人才保证和智力支撑。

国家自然科学基金委员会将按照科学基金发展的指导思想、总体思路 and 战略部署,围绕发展目标,按照研究项目、人才项目、环境条件项目三个系列的资助格局,切实增强战略意识和全局意识,统筹安排资助计划。着力发挥推动学科均衡发展的重要作用,形成更为科学合理的学科布局,构建与创新型国家相适应的坚实学科基础;着力发挥激励和培育创新思想的重要作用,激励科学家自由探索精神和创造潜能,提升基础研究整体水平;着力发挥稳定和培育创新人才的重要作用,建设适应未来需求的高水平基础研究队伍,积累支撑创新型国家建设的智力资本;着力发挥调动科技资源配置的重要作用,推动科技资源整合,促进国家创新体系建设;着力发挥统筹利用全球科技资源的重要作用,充分吸纳和利用海外资源,提升我国基础研究的国际竞争力。

根据国家自然科学基金“十二五”发展规划的总体部署,国家自然科学基金委员会将坚持更加侧重基础、更加侧重前沿、更加侧重人才的战略导向,进一步优化资助模式,实施原始创新战略、创新人才战略、开放合作战略、创新环境战略和卓越管理战略,形成更具活力、更富效率、更加开放的中国特色科学基金制,推动学科均衡协调可持续发展,促进若干主流学科进入世界前列,推动高水平基础研究队伍建设,造就一批具有世界影响力的优秀科学家和创新团队,推动我国基础研究整体水平不断提升,显著增强基础研究的国际影响力和若干重要科学领域的自主创新能力,为科技引领经济社会可持续发展、加快建设创新型国家奠定坚实的科学基础^[15]。

随着国家对基础研究投入的不断增加,2011年国家自然科学基金委员会对部分类型项目的资助强度和资助期限等进行了调整:

- (1) 面上项目资助期限由3年延长为4年;
 - (2) 重点项目资助期限由4年延长为5年;
 - (3) 青年科学基金项目资助期限仍为3年,其中女性申请人的年龄限制推迟至未满40周岁;男性申请人的年龄限制维持未满35周岁不变;
 - (4) 地区科学基金项目资助期限由3年延长为4年;
 - (5) 科学仪器基础研究专款项目资助期限由3年延长为4年;
 - (6) 重大国际(地区)合作研究项目资助期限由3年延长为5年。
- 为防范学术不端行为,避免重复资助,自然科学基金委自2011年起将通过

计算机软件对申请书内容进行比对, 特提醒申请人注意:

(1) 不得将内容相同或相近的项目, 向同一科学部或不同科学部申请不同类型项目的资助;

(2) 受聘于一个以上依托单位的申请人, 不得将内容相同或相近的项目, 通过不同依托单位提出申请;

(3) 不得将内容相同或相近的项目, 以不同申请人的名义提出申请。

为提高管理工作效率, 使申请人和依托单位准确理解限项申请规定, 自然科学基金委自 2011 年起对原限项申请规定进行了简化, 新规定如下:

(1) 各类型项目限项申请规定。申请人 (不含参与者) 同年只能申请 1 项同类型项目。

(2) 申请和承担项目总数限为 3 项的规定。具有高级专业技术职务 (职称) 的人员, 申请 (包括申请人和主要参与者) 和正在承担 (包括负责人和主要参与者) 以下类型项目总数合计限为 3 项: 面上项目、重点项目、重大项目、重大研究计划项目 (不包括集成项目和指导专家组调研项目)、联合基金项目 (指同一名称联合基金项目)、青年科学基金项目、地区科学基金项目、国家杰出青年科学基金项目 (申请时不限项)、国际 (地区) 合作研究项目、科学仪器基础研究专款项目、优秀国家重点实验室研究专项项目, 以及资助期限超过 1 年的委主任基金项目、科学部主任基金项目等。

(3) 作为负责人限获得 1 次资助的项目类型有青年科学基金项目、国家杰出青年科学基金项目。

(4) 不具有高级专业技术职务 (职称) 人员的限项申请规定。作为申请人申请和作为负责人正在承担的项目数合计限为 1 项; 在保证有足够的时间和精力参与项目研究工作的前提下, 作为主要参与者申请或者承担各类型项目数量不限。

(5) 不受申请和承担项目总数 3 项限制的项目类型包括创新研究群体项目、国家基础科学人才培养基金项目、海外及港澳学者合作研究基金项目、数学天元基金项目、国际 (地区) 交流项目、国际学术会议项目、科普项目、重点学术期刊专项基金项目、青少年科技活动专项项目、委托任务及软课题研究项目、资助期限 1 年及以下的其他类型项目, 以及项目指南中特殊说明不限项的项目等。

1.6 工程热物理与能源利用学科发展思路

工程热物理与能源利用学科的资金支持的目的是为我国的能源技术创新发展

奠定基石。该学科的宗旨是,准确把握支持基础研究、坚持自由探索、发挥导向作用的战略定位,认真落实尊重科学、发扬民主、提倡竞争、促进合作、激励创新、引领未来的工作方针,始终坚持依靠专家、发扬民主、择优支持、公正合理的评审原则,着力培育创新思想和创新人才,推进科学基金制不断完善和发展。要认清基础研究的科学问题、科学自身发展和经济社会发展的“两个来源”,即其发展受来自科学系统自身不断拓展和深化的内部需求以及来自经济社会发展的外部需求的“双轮驱动”,营造宽松环境,坚持自由探索实现自主创新,营造宽松环境是推动自主创新。这将是未来基金支持的基本原则和评判准绳,也是保证基金发展重点与主要任务完成的前提。

对各分支学科现状和趋势的分析充分表明,我国工程热物理与能源利用学科在基础研究方面已经取得了令人鼓舞的成就,为下一步全面追赶和整体达到世界先进水平奠定了良好的基础。然而,总体上的差距仍然存在,表现为:基础理论原创性、系统化和深度有所欠缺;应用基础和技术更多停留在传统内容层面,与国际最新进展和技术水平还有差距;我国的基础研究成果,较少能直接服务或在高科技发展中发挥关键性作用。从支持基础研究的角度,未来应强调:一是在研究深度上,继承并超越国际现有的研究方法和思路,结合我国工业发展的具体需求特点,深入研究解决现实中制约我国国民经济发展的科学与关键技术基础问题;二是加强原创性,在广泛深入认识国际科学前沿基础上,寻找突破口进行创新研究;三是在研究广度上,强化学科交叉,为实际工业问题提供解决方案;四是要体现现实性,要立足本国实际,使研究成果转化为生产力,为我国的现代化建设添砖加瓦;五是作为探求自然的基础,必须持续努力积累、丰富基础知识和建立符合改造世界要求的学科体系,还应该担负起向更为广泛的社会和大众传播节能环保知识与理念、培养造就具备新知识体系和崭新科学理念创新人才的责任。这些都是工程热物理与能源利用学科极为重要且必不可少的定位方向和内涵。

上述这些总体任务、研究方向、现实需求,为规划研究工程热物理与能源利用学科发展战略和安排研究工作提供了指南。综合考虑我国的现实情况,基于国家自然科学基金根本定位和工程热物理与能源利用学科的基本内涵,着重强调基础研究是一切创新的源泉,不断深化对基础研究发展规律、创新人才成长规律和科学基金管理创新规律的认识,探索通过整体评估促进科学发展的长效机制,为此:

(1) 必须以学科布局合理、奠定长期发展基础和提高整体水平为目标,突出更加侧重基础,推进学科发展。突出更加侧重前沿,加强重点部署。推进仪器基础研究,提升自主创新能力。重点加强学科基础,突出原创性基础研究,鼓励对学科长期发展立意新颖且有重要学术影响、具有鲜明探索性以及针对薄弱基础

环节的播种类型研究。发挥科学基金的导向作用。

(2) 引进新思想、新观念和科学技术新进展的最新理论与方法,继续大力促进工程热物理与能源利用学科基础和技术的研究,延伸学科内涵,开拓应用领域,关注涉及自然世界能质相互作用与转化的基本内涵和规律等理性科学探索,促进交叉领域研究,努力为本学科的发展注入新活力。

(3) 瞄准国际学术前沿和最高水准,密切围绕国家需求的重大创新技术基础,拓展学科基础内涵和研究领域;特别要注重从现代高新技术、经济发展急需的实际应用中凝练工程热物理与能源利用学科基础科学问题,使学科发展、科学研究与应用服务融入到科学技术发展和经济建设的主流。

(4) 立足国家人才工作全局切实培育创新人才,尊重科学规律,不断探索人才发现遴选、评价和激励保障机制,打造科学基金人才资助培养链,营造有利于人才成长和发挥作用的良好环境,强化针对培养和造就创新人才、自由探索的研究。统筹各类项目资助部署,优化人才资助结构和布局,支持边远贫困地区和少数民族地区人才培养,扶持女性科技工作者健康成长。

(5) 积极落实开放合作战略,统筹利用国内外科技资源,推进实质性合作研究,营造有利于科学家更好参与国际(地区)科学合作的开放创新环境。在加强多层次、多方位、宽领域国际合作的同时,力争在具有我国特色和优势的某些领域逐步形成以我为主的合作格局,构建以我为主的国际(地区)合作研究网络,进一步提升我国基础科学的国际地位和影响力。

参 考 文 献

- [1] 国家自然科学基金委员会工程与材料学部. 学科发展战略研究报告(2006~2010年)——工程热物理与能源利用. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 温家宝. 科技界大会讲话: 让科技引领中国可持续发展. 北京, 2009.
- [3] 温家宝. 关于科技工作的几个问题. 求是, 2011, 14: 5—13.
- [4] IEA. World Energy Outlook. Paris: IEA, 2011.
- [5] IEA. Coal Mine Methane in China: A Budding Asset with the Potential to Bloom. Paris: IEA, 2009.
- [6] “十五”国家高技术发展计划能源技术领域专家委员会. 能源发展战略研究. 北京: 化学工业出版社, 2004: 98—146.
- [7] IPCC. Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [8] 中国科学院. 我国节能情况调研和对策研究. 中国科学院院士咨询报告, 2006.
- [9] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年). 2006.

- [10] DOE. A Report to Congress by the Secretary of Energy. Washington DC: Department of Energy Office of Civilian Radioactive Waste Management, 2008.
- [11] 中华人民共和国国务院. 国务院关于加强培育和发展战略性新兴产业的决定. 北京: 国发〔2010〕32号, 2010.
- [12] 中国科学院. 关于发展我国大规模可再生能源基地与相关技术研究的建议. 中国科学院院士咨询报告, 2007.
- [13] IPCC. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [14] 陈宜瑜. 在国家自然科学基金委员会 2010 年六届三次全委会会议上的讲话. 北京, 2010.
- [15] 国家自然科学基金委员会. 国家自然科学基金“十二五”发展规划. 中国科学基金, 2011, 5: 62—68.

第2章 工程热力学

2.1 学科内涵与应用背景

工程热力学是热物理学的基础和主要学科分支,能源科学与工程热物理学的许多基本概念、定义和反映热过程本质的规律都在热力学中奠定。工程热力学的本质是研究能量相互转换的规律,特别是热能转换为机械能或电能的规律,其目的是追求从不同形式的能量中获取最大的功,或消耗最小的功获取最大的冷能和热能的理论和方法。工程热力学的发展与整个工程热物理学的发展休戚相关,直接影响着工程热物理学发展所能达到的深度、高度和规模,许多分支中出现的涉及热过程实质的问题常常需要在工程热力学中寻求答案^[1]。

工程热力学已经渗透到各种科学和技术领域,并形成许多新的分支学科。但其主要研究对象仍是热能与机械能之间的相互转换规律和方法以及提高其转换效率的途径的研究,所涉及的主要领域仍为能源与动力工程。同时,人们也注意到化石能源的大量使用给地球环境造成了严重危害,使人类生存空间受到了极大的威胁。面向可持续发展的绿色能源战略背景,以及节能环保、新能源等国家战略性新兴产业发展的重大需求^[2],工程热力学的总目标定位在:重点解决能源利用与环境相容协调的难题,即不断提高能源利用率和减少污染。相应地,主要核心科学问题也不应仅仅局限于传统的热力学范畴,而应是与环境、化工等领域形成广泛的交叉,拓展新的学科方向。工程热力学主要包括基础热力学和非平衡热力学、热物性学、热力循环与总能系统、制冷与低温工程学及其与其他学科的交叉等。

1. 非平衡态热力学及计算统计热力学

经典热力学以研究平衡状态和可逆过程为基本内容,不涉及宏观系统状态随时间、空间的变化,属于热静力学(Thermostatistics)的范畴。经典热力学用一些标量性的集总参数(如 p 、 T 、 v 、 h 、 s ……)来描写宏观系统的状态,使得许多在工程上具有重要意义的矢量过程、张量过程,特别是一些与时间相关的过程得不到充分的描述。而非平衡、非稳定状态及过程在实践中大量存在,对这些动力学过程的研究却不能从经典热力学得到有力的支持。

虽然在近平衡区已有著名的昂萨格理论(1968, 诺贝尔化学奖), 在远离平衡区有著名的耗散结构理论(1977, 诺贝尔化学奖), 但将它们用于热能与动力工程的研究中还存在一定的距离。这就形成了热力学理论的现状与实际应用的需求之间不相协调的现象。

特别是近年来科学和技术进步的一个重要趋势是向微型化发展, 微型化的共同特征是物质和能量的转换、输运均发生在一个受限的微小结构内, 因此描述宏观系统的热力学理论受到了新的挑战。对于所有微系统的设计及应用来说, 全面了解系统在特定尺度内的热物性、热行为等已经成为迫在眉睫的任务^[3~5]。

2. 热物性

长期以来, 热物性学在科学研究、社会建设以及日常生活中发挥着非常重要的作用。在能源动力、航空航天、化工、石油和制冷空调等领域中都必须依靠相应工质的状态变化来实现能量的转换与利用, 工质的基础物性数据是我们开发和设计能源动力、化工和制冷等机械设备、优化系统流程、评价能量系统性能和经济性等不可缺少的参数。当前, 在世界各国应对全球变暖的形势下, 热物性学在环保型工质替代、CO₂ 的捕集、封存及利用、新型动力循环中扮演着至关重要的角色。

热物性学的研究目的是描述物质存在的状态和性质, 通过实验或其他方法获取物质的各种热物理性质数据, 揭示物质热物理性质的内在规律, 为科学研究和工程应用提供必要的基础。通过热物性的研究, 可从宏观和微观两个角度更好地认识物质的组成和结构、物质性质的基本规律、物质世界的本质问题, 具有非常重要的理论意义和科学价值。热物性学从研究内容上看主要是通过实验测试、理论探析和计算机模拟方法来研究流体和固体材料在各种温度压力范围内的基础热物理性质^[6]。

以环保替代工质为重大应用背景, 近十几年来热物性基础数据、测量技术、理论关联和计算方法等都有长足的发展。近些年来, 因科学发展和工程应用提出了新的要求, 混合工质的热物性参数、热物性理论描述与推算、热物性测量新技术及热物性计算机模拟等方面的研究成为热点。随着温室效应的加剧, 世界各国对温室气体的减排愈加重视, CO₂ 捕集与封存(CCS)技术的研究与开发成为重要课题, 在CO₂ 的捕集、压缩、输运以及封存过程中都离不开CO₂ 及其混合物的热物性参数, 因此该方面的研究也成为国际热点问题。

3. 热力循环与总能系统

人们一直在孜孜不倦地从不同途径探索新的热力循环, 但没有新概念、新技术、新材料、新工质的出现, 就没有新的热力循环, 也就没有动力装置的更新换代和性能的大幅度提高。一个新概念提出或新技术突破, 常会萌发出新的热力循

环构思, 开发出新的动力装置与能源系统。例如, 燃气轮机采用注蒸汽手段而形成的 STIG 循环 (程氏循环), 采用湿化技术提出的湿空气透平循环 (HAT); 汽轮机采用新工质 (混合工质) 的 Kalina 循环; 还有一些新的循环则借助化工技术, 如燃料重整的热回收循环和带化学链反应燃烧的新型动力循环等。20 世纪七八十年代, 总能系统概念的提出, 使得热力循环研究思路发生质变, 人们不再囿于单一循环的优劣, 更重视探讨把不同循环有机结合起来的各种高性能联合循环, 热机发展应用基于把能源利用提高到系统高度来认识, 即在系统的高度上, 综合考虑能量转换过程中功和热的梯级利用, 不同品位和形式能的合理安排以及各系统构成的优化匹配, 总体合理利用各级能, 以获得最好的总效果。例如, 以燃气轮机为核心的总能系统, 既能充分发挥其高温加热优势, 又能避免较高温排热、损失大的缺陷, 显示出极好的总体性能, 因而得到电力、石化、冶金等部门的青睐, 以联合循环、功热并供、三联供、多联产以及总能工厂等多种形式广泛应用。在航空领域, 内外涵循环的提出大大降低了航空发动机的油耗率, 推动了高速民航的飞速发展; 变循环发动机和可变几何发动机提高了航空发动机对各种工况的适应性, 提高了其应用范围。

热力循环研究的新思路应不光局限于燃烧后或其他形式获得的热能的热力循环, 而是要关注和重视燃烧前燃料化学能和其他形式能量, 如太阳辐射能转换为热能之前的做功能力的利用潜力。对于化石燃料, 通过逐级、定向转化等不同燃烧前化学能的有序释放与热力循环相结合的研究, 可以从能的品位角度, 更好地认识燃料化学能做功能力品位的组成和结构、燃料品位转化的基本规律、燃料化学能与物理能的综合梯级利用等本质问题。这些问题的研究为能源与动力、化工与动力多联产等不同领域的总能系统的科学研究和工程应用提供了必要基础, 具有非常重要的理论和科学价值。

热力循环研究的新思路是将梯级利用的概念引入化学能及化学能向物理能转化的阶段, 实现化学能与物理能的综合梯级利用。为此, 注重热力学循环与非热力学系统的结合及其循环创新, 通过多层次不同品位能的梯级利用, 来实现更高效的目标。热能 (工质的内能) 与化学能的有机结合、高效的综合利用, 不仅注重了温度对口的热能梯级利用, 而且有机地结合了化学能的梯级利用, 可以突破传统的联合循环的概念, 实现领域渗透的系统创新, 为化工 (液体燃料)、动力多联产系统与多功能等系统的集成创新奠定理论基础。

热力系统动态学是工程热力学的重要组成部分, 其研究范畴既涉及宏观层面的能源动力装置及系统的动态学和控制, 也涉及流动、燃烧、传热等热物理过程的动态学和控制。热力系统动态学主要研究热力系统在各个时空尺度下的流动、燃烧、传热、能量转换的动力学特性及其动态模型, 研究热物理过程的演化规律以及稳定性 (包括分岔、突变和混沌等), 研究流动、燃烧、传热等微观、介

观、宏观过程的控制、优化和状态监测方法,实现热力系统安全、高效、环保地为人服务的目的^[7~9]。

4. 制冷与低温工程学

制冷与低温工程学是工程热力学的一个重要分支学科,其主要任务是基于各种制冷效应的基本原理,综合应用工程热力学、传热传质学、多相流以及热物性学、材料学等各分支学科的知识,通过合适的制冷循环,以人工的方法实现低温环境。制冷与低温工程学的研究不仅扩展了热力学的研究内容,促进了对物质在低温条件下的热物性研究,发现了物质在低温下某些奇异的物理现象(如超导现象、氦的超流现象等),而且还极大地推动了低温技术与物理学、生物学、电子学的交叉与发展,产生了诸如低温物理学、低温医学、低温电子学、超导电工学等许多新兴和交叉学科^[10~12]。

制冷与低温技术在国民经济建设和高新技术领域中的应用,一些应用领域见图2.1所示。其应用体现在:①在高温区($5\sim 80^{\circ}\text{C}$),主要用于空气调节和热

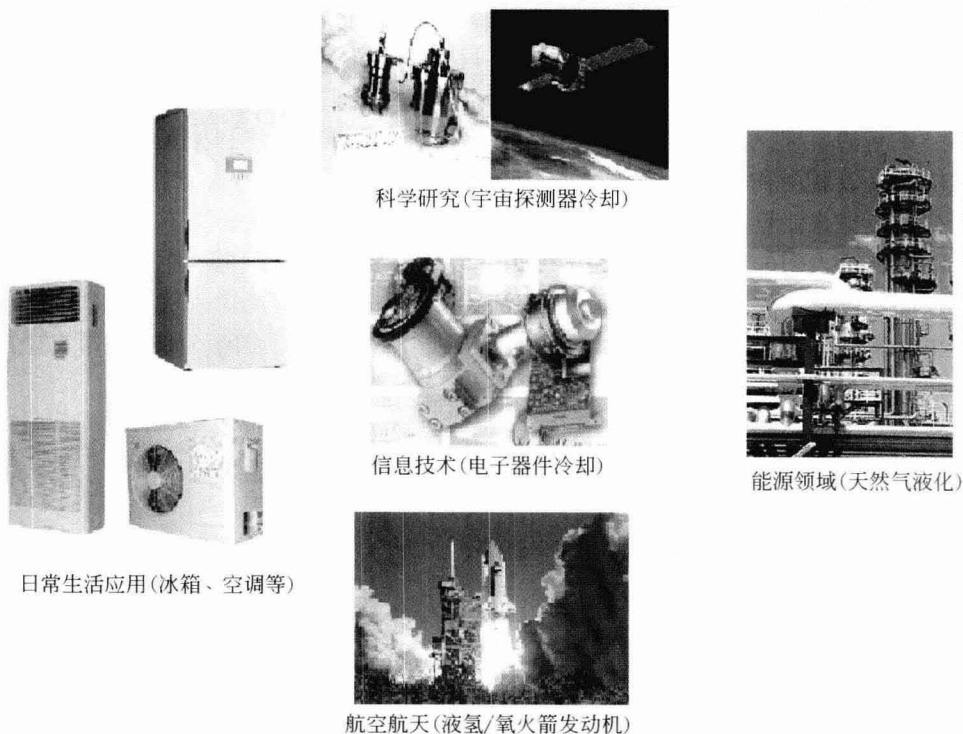


图2.1 制冷与低温技术在国民经济建设和高新技术领域中的应用

泵设备；②在中温区（ $-150 \sim 5^{\circ}\text{C}$ ），主要用于食品冷冻和冷藏、化工和机械生产工艺的冷却过程、冷藏运输、生物医学工程以及低温外科手术等；③在低温区（约 -150°C 以下），主要用于气体液化、低温物理、超导技术、航空航天以及低温电子冷却等。这些应用不仅显著地改善了人们的生活质量，而且极大地推动了航空航天技术、信息技术、生物技术等许多高新技术的发展。

5. 学科交叉

实际的自然现象是错综复杂的，热现象常常渗透到各种物理现象中，几乎无处不在，热物理学与其他学科的交叉是客观的必然要求。首先是热物理学领域内各学科分支的交叉，它包括热力学、传热传质学、流体力学等。过去由于自成体系，使这些原本研究同一现象的学科缺乏彼此的协同和融合。大力加强学科交叉已成为共识。例如，“NBIC 会聚技术”将纳米、生物、信息和认知等当前迅猛发展的四大科学技术领域有机地结合与融合，被认同为科学界重大交叉与可取得突破的新兴发展领域。能源、环境、资源的三大领域相容与协调，与 NBIC 一样，从基础科学的概念、方法和机理到能源网络、技术路线的应用，不仅是新兴领域和重大科学方向，同时是涉及社会经济可持续发展的重大科学问题。

近些年，以节能减排为重大应用背景，对工程热力学科学发展又提出了更高、更新的要求。以往热力循环研究都是能量利用与 CO_2 控制相互独立，难以解决能源高效利用和减排的矛盾。面向可持续能源发展战略需求，热力循环的科学研究还应重视能量转化与 CO_2 控制的相互作用，认识到直接燃烧不仅造成燃料化学能做功能力损失最大，而且也是 CO_2 产生的根源。在燃料化学能做功能力梯级利用的基础上，发现燃料转化源头捕集 CO_2 的新方法、新规律。基于燃料化学能梯级利用的 CO_2 新型控制理论是热力循环科学的重要研究方向，研究成果有望产生热力学与环境学的交叉学科新分支。

2.2 国内外研究现状与发展趋势

2.2.1 非平衡态热力学及计算统计热力学

建立新的热力学理论必须抓住实际热过程最本质的特征——不可逆性，直接面对实际的非平衡态不可逆过程，从热静力学发展到热动力学，从近平衡区的线性热力学发展到远离平衡的非线性热力学，科学家已就此做了大量的工作。

从 20 世纪 50 年代开始就形成了诸如“非平衡态热力学”、“不可逆过程热力学”、“扩展不可逆过程热力学”、“理性热力学”、“数学热力学”等不同的学派。

不同学派的观点有许多相近之处,但也有不少相异甚至相悖之处。建立一套方便易用又为大家所公认的非平衡态热力学理论体系仍然是一个亟待探讨的课题。

非平衡态热力学的应用甚为广泛,特别是在化学、物理过程和生物学、生化系统中的应用更令人瞩目。例如,利用非平衡态热力学可以理论研究实际相变问题,确定流体的极限过热度和过冷度,从理论上推算液体沸腾时的核化率、加热表面的临界热负荷、熔化和结晶过程的热力学分析、主组元结晶及杂质共晶的热力学驱动力及二者的耦合作用和杂质的分布(在单晶制备中有重要作用),进行混合及分离过程的热力学分析:界面现象、表面热力学、吸附及脱吸分析等,在以上各方面均有成功的应用。又如,利用分数维数及分数阶导数研究渗透和胶体的集并,通过裂缝及多孔介质的质量输运及其与热量输运的耦合过程(一维或多维),特别是利用李雅普诺夫(Lyapunov)的稳定性理论,运用李雅普诺夫指数及超熵产来分析热动力学系统的稳定性问题,研究混沌解出现的条件及其控制、系统行为的有序化等,其方法简便,得到的结论多数能得到实验的验证,不失为一种值得推荐的稳定性分析方法。

随着高新科技的发展,微尺度热现象日益成为热科学中的一个研究热点。微尺度包括微空间尺度、微时间尺度及微结构。在微尺度下惯用的介质连续性假定不再成立。建立在此假定基础上的相关理论不再奏效,这就迫使人们回到对物质世界最基本的认识和模型上,即回归到由分子、原子、电子等微粒组成的离散系统行为上,于是分子模拟方法应运而生。所幸的是计算机科学的发展为这一方法提供了有力的支撑,使之得以迅速发展。进一步的研究发现,分子模拟对宏观现象及特性的微观机制和规律的研究也不失为一个有力的工具。

分子模拟(molecular simulation)包括分子动力学模拟(MD)方法和蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)随机模拟方法,其理论基础是分子热力学和统计热力学。可以认为,分子模拟即是“计算统计力学”。第一个液体的分子模拟是1953年在Los Alamos实验室在MANIAC计算机上完成的,用的是蒙特卡罗方法。其后,在1957年和1959年, Alder 和 Wainwright 分别引入了分子动力学模拟方法。目前,分子动力学模拟和蒙特卡罗方法已广泛地用于许多领域,如化学、制药、材料、微流体机械等^[13]。

在研究对象上,从简单流体到复杂流体,从非极性分子(如单原子气体)到强极性分子(如水),从简单分子到链型分子、聚合物和生物分子,从单组元流体到混合物,从非金属原子到金属原子和金属化合物。在模型上,描写分子间相互作用的势函数的确定是进行模拟的前提。截至目前,已提出了大量适用于不同物质的势函数模型,如水分子间相互作用的势函数就有四十多种。但大多数的模型仍仅考虑了双体作用势,而对多体相互作用没有得到充分描写。另外,在模

拟算法上,目前虽提出了不同算法(如广泛采用的 Verlet 及其修正算法、Gear 算法等),但发展更为简单快捷而具有高精度的算法仍是学者们关注的问题。随着计算机硬件技术的快速发展,有效的并行算法的发展也是值得探讨的内容。在模拟的尺度上,虽然分子模拟在纳米尺度、格子-玻尔兹曼方法和耗散粒子动力学模拟方法在介观尺度、连续介质方法在宏观尺度方面已经取得了研究成果,但跨尺度的研究还刚刚兴起,需要大力发展。在研究内容上,主要涉及物质的热力学特性(如维里系数、比热容等)及动力学特性(如导热系数、扩散系数、黏性系数、表面张力等输运系数)的确定,热现象及热过程的微观机制和规律的研究(如相转变、相平衡、相分离、界面现象、沉积、结晶过程、吸附、化学以及生化过程等)。在理论上,既涉及平衡热力学,又涉及非平衡统计热力学^[14]。

2.2.2 热物性

随着人们保护臭氧层行动的逐步实施以及对全球气候变化越来越深刻的认识,过去的 20 年全球范围内逐步开始用氢氯氟烃(HCFCs)、氢氟烃(HFCs)以及其他环保型工质替代氯氟烃(CFCs)类物质,并且向大气中排放的卤代烃量也在不断减小,大气臭氧层的破坏得到了有效抑制。从大气中观测到的 CFCs、HCFCs 和 HFCs 的总 CO_2 当量排放从 1990 年左右的 7Gt CO_2 当量/年减少到 2000 年左右的 $(2.5 \pm 0.2)\text{Gt CO}_2$ 当量/年,分别相当于来自全球化石燃料燃烧的 CO_2 年排放量的 33% 和 10%,对于减缓全球气候变化起到了至关重要的作用。观测数据和模式计算表明,全球臭氧层耗损量目前已经趋于稳定,研究和减小直接温室气体的排放是目前以及未来国际的研究热点,其中重要途径之一是在各行业使用较低或可忽略不计的全球变暖潜值(GWP)的替代工质。新工质的工程应用,迫切需要可靠、精确的热物性数据作为基础。

目前,国际上在广泛开展关于新型替代工质的研究,最近两年提出了新型 HFCs 类工质,如 HFC-1234ze, HFC-1234yf 等,它们的 GWP 较低,其热物性研究初步展开。同时,国内外还在致力于天然工质的研究,如 CO_2 、碳氢类工质及其混合物等。此外,吸收制冷新工质研究也方兴未艾,以离子液体为吸收剂的工质正成为一个全新的研究方向。然而这些研究尚处于初始阶段,在推广应用之前仍需开展大量的基础热物性研究工作。寻找与环境兼容性更优的长期替代物以及对新工质、混合工质热物性的研究仍是我们面临的主要课题和重要任务。

随着自动控制技术、计量测试技术、计算机技术的进步,基于声学、光学、电学等理论的热物性实验方法在近年来也获得了快速发展,新型热物性测量系统应运而生,在线测量系统的开发也得到了重视;热物性实验的精度相应有了很大的提高,测试范围在逐步扩大,低温、高温区以及高压区热物性测量得到了发

展。随着理论研究的深入,人们对热物性测试中的各种非理想因素及其修正方法也有了更深入的认识和发展^[15]。

基础理论的新发现对于热物性学科发展具有重要推动作用。例如,临界重正化群理论的发展,使得临界区成为实际流体整个热力面上人们具有完全精确知识的区域之一,但它只适用于临界点附近的微小区域,如何利用重正化群理论修正传统理论方法,如何使重正化群理论与人们已掌握的常规区域的经典规律相“跨越”,成为热物性学研究的重要课题。再如,关于界面张力的研究是能源动力、制冷空调、化工、石油、矿物浮选等多个领域的基础问题,传统上是采用实验与经验关联的办法加以描述,对于混合工质(特别是完全互溶体系),为了获得精确和统一性的描述,有学者提出将密度函数梯度理论和密度泛函理论引入界面层的描述。由于热物性学研究的是物质的自然属性,因而不断引入并发展其他学科对物质特性描述的最新理论和发现是热物性学的重要研究内容。

作为关联和描述工质热力学性质的重要手段,状态方程的研究已成为一个相对独立的研究方向。近年来在状态方程研究领域主要有以下热点:①高精度、大区域解析型状态方程及其优化拟合方法的研究;②经验型状态方程特别是立方型状态方程的改进。尽管计算精度不如专用状态方程,但立方型方程形式简单、参数易确定、计算便捷,在工程上应用广泛;③理论状态方程的研究从微观的分子间作用力出发,应用统计热力学方法、微扰理论等建立的纯理论状态方程,具有理论基础好、适用物质范围广等优势,随着精密热力性质实验数据的发表和对物质微观性质认识的深入也获得了长足发展^[16]。

为了应对全球气候的变化,减小温室气体排放,CO₂捕集与储存(CCS)技术成为各国研究的热点和重点课题。CO₂及其混合物的PVT(*x*)性质、气液相平衡性质、动态湿润特性及动态表面张力等热物性的研究是该技术高效节能实现的关键基础之一,目前已引起了广大科技工作者的兴趣,此方面的工作得到逐步开展^[17]。大分子离子流体吸收CO₂过程中的热物性问题技术也得到了广泛关注。太阳能、燃料电池等清洁能源技术得到了快速发展,太阳能热发电、制氢、储氢过程中涉及的热物理问题不断凸显。新型含氧燃料(包括醇类、醚类、酯类等物质及其混合物)和生物质等环保替代燃料得到重视,对新工质热物理性质的精确描述以及在推广应用中新问题亟待解决。纳米流体的热物性测量与理论研究也具有非常重要的意义。

2.2.3 热力循环与总能系统

热力循环一直是工程热力学的主要研究内容,特别是新型热力循环与相应新工质研究成为永恒的研究方向。热力循环在热力学和动力机械发展史上占有重要

位置,是热机发展的理论基础和能源动力系统的核心,也是热力学学科开拓发展的一个推动力与理论基础。历史经验表明,每一次新的热力循环及其动力机械的发展与应用都带动了能源利用的飞跃,推动了社会进步和生产力发展。11 世纪的走马灯为热机最早的雏形;1798 年著名的炮膛试验则是一个热功转换定量研究的范例;18 世纪蒸汽机的出现,开始了人类现代文明的新纪元,带动了第一次产业革命与资本主义成长,也推动了工程热力学的全面展开;利用石油的往复式内燃机 (Diesel、Otto 循环)、汽轮机 (Rankine 循环) 的发明和推广应用,人类进入石油时代,为机械化、电气化创造了条件;20 世纪中叶,燃气轮机与喷气发动机 (Brayton 循环) 的出现和发展,则为现代高速航空和宇航动力奠定基础。

热力循环是发展能源动力系统的核心与理论基础。热力循环的主要研究方向在于不断提高循环的最高温度与最低温度之比和提高部件性能。复合热力循环概念的提出,实现了热力过程中能量品位的梯级利用。目前得到广泛应用的复合循环是联合了适合较高温区的 Brayton 循环与适合较低温区的 Rankine 循环的燃气蒸汽联合循环,其最高热效率已接近 60%。但这些研究都还局限在物理能转换利用“温度对口、梯级利用”的范畴^[18]。

国内从事热力循环研究的单位较多,包括能源动力、航空航天以及舰船等领域的科研队伍,他们在国内外学术界都很活跃,形成了一定的科研实力并取得了较好的科研成果。例如,对各种燃煤联合循环,他们曾经进行了结合国情的全面分析研究,为国家相关高技术发展项目的立项和设计提供了重要的参考与支撑依据;开拓性地提出了多种新型热力循环,如率先提出的氢氧联合循环等;率先给出燃气轮机及其功热并供装置变工况的典型显式解析解,理论上总结了其变工况特性;而在考虑装置变工况特性的前提下,开展了经济与环保等方面优化准则的研究,这在国际上也是刚刚起步。

随着能源系统向大型化、复杂化方向的发展,研究领域与化工、环境等不同学科的融合与交叉,总能系统的热力学分析理论的研究近年明显拓展和延伸,内涵已超越了热力学第一定律的热平衡法和热力学第二定律的焓方法,对热力学学科的发展产生了重要的推动作用。例如,总能系统优化理论的研究,近年来蓬勃发展,特别是伴随着总能系统呈现出多能源互补和多功能的特点,系统集成优化理论越来越集中在多目标统一量化的评价准则的研究上,以认识和直接描述总能系统的综合性能指标。最近出现的以全工况和独立变量概念为基础的总能系统全息特性集成优化理论,包括变工况下的热力特性、运行特性、经济性以及环保性等各方面,已取得了一定成果;将此理论初步与整体煤气化 IGCC 示范发电系统设计相结合,这方面的研究已成为国际热点。

另外,近年热力循环范畴有些拓宽,越来越多的化学反应过程与热力循环相融合,因而引起一些新的能量转化现象。对热力循环的分析方法,从经典热力学第二定律的“黑箱焓分析法”到20世纪80年代出现的图像焓分析法,都对不同能量性质的转化过程,特别是对于新一代燃料化学能与物理能综合梯级利用的总能系统的研究显得有些困难。尽管图像焓分析法,从能量转换和传递的微观情况能够去展现能量释放侧和能量接收侧的能的品位变化,但更多描述的是单一能量转化中的能量释放侧和接收侧间的品位关系,无法解释多个关联、相互作用的能量转化过程出现的化学能与物理能的综合梯级利用的新现象。最近提出的“能的品位变化规律”分析法,以建立能量转化过程间的品位相互性为目标,揭示多个能量转化、传递中化学能与物理能的品位基本关系和相互作用机制,克服了传统热力学“焓平衡”方法不能深层次剖析不可逆损失本质的局限性。特别是对于揭示化工与动力多联产这样不同功能、不同组合复杂系统出现的能量释放新机理、新规律、集成机理都是非常有意义的工作。这些也是总能系统理论研究出现的最富有挑战性的科学难题之一^[19]。

但是,也应该看到,总体上讲,我们的差距还是比较大。在与能源、环境方面密切相关的热力学、总能系统的基础研究上,一些先进国家已经从过去的关键单元、设备、技术的研究走向循环、系统、战略路线的研究,已经具有基于前瞻性、战略性为前提的基础研究水平。

目前,在热力系统动态学方面,随着各种大型复杂能源动力系统的发展(如循环流化床、超超临界机组、IGCC、多联产系统等),热力系统表现出不确定性、非线性、大滞后和多回路耦合等特性,不确定性模型集建模、混杂系统建模方法开始引入热力系统研究领域,热力系统控制对各种先进控制策略也有很强的需求,热力系统的多变量鲁棒控制、预测控制、模糊控制、神经网络控制、多模型控制、非线性控制等先进控制方法一直是重要的研究方向。

随着热力系统参数范围的扩展,尤其是近年来航空航天领域的发展,许多热力系统内部出现了极端条件下的工程热物理问题(高速、高温、高热流、高强度燃烧),对象工作过程中特征时间尺度大大缩短,对象的分布参数特征表现明显,面向流场、燃烧场的主动控制和分布参数控制对提高动力系统性能表现出了重要的作用,成为热力系统控制研究的新热点。与此同时,热力系统内部的非线性现象及由此引出的控制问题也引起了广泛关注,热力系统中广泛存在着分岔、突变和混沌现象,其内部物理机理涉及复杂的非线性动力学问题。在稳定性分析方面,李雅普诺夫方法已取得不错的成果,但这些热力过程中所出现的复杂非线性现象的建模和控制仍面临很多难题,是一个有待大力开拓的研究领域。

在全球能源危机的背景下,以节能为目的的热力系统优化控制成为另一个热

点,特别是近年来伴随着智能建筑、航空航天和可再生能源等现代能源动力系统的迅猛发展,提出了大量与时变环境条件下热力循环性能优化紧密相关的问题,例如:现代化建筑的热泵系统通过采用蓄冷设备和储热系统可以在变负荷条件下运用优化控制策略降低空气调节能耗。热力系统普遍工作在时变环境(自然环境和用户环境)之中,系统内部储能环节的存在会引起热力系统运行效率的动态变化,运用最优控制的理论和方法来优化热力系统在动态条件下的能量转换过程具有重要的理论意义和实用价值。

热力系统的状态监测和故障诊断是系统可靠工作的保障,一直是热力系统动态学的研究内容之一。为了有效监测系统状态,热力系统各部件和子系统都安装了大量传感器和大容量数据采集系统,有效挖掘海量动态数据中蕴含的热力系统演化规律和灾变机制,是预防和消除故障的重要手段,海量时序混合数据的知识发现、动态模式识别等成为重要的热点研究课题。

2.2.4 制冷与低温工程学

作为重要的能源转换利用技术以及若干高新技术的关键支撑技术之一,制冷与低温工程技术在 20 世纪得到了空前的发展和应用。然而,随着环境的恶化、能源的大量消耗以及许多高新技术的迅速发展,目前成熟、常规的制冷与低温技术已难于满足 21 世纪可持续发展战略的要求,需要进行新的发展、完善和创新。

众所周知,自 20 世纪 30 年代以来,CFCs、HCFCs 化合物为制冷工质的蒸气机械压缩式制冷技术(也称为氟利昂制冷技术),在食品保存、空调系统中获得迅速发展和广泛应用,但现今却面临破坏大气臭氧层和产生温室效应等严峻的环境问题。自 20 世纪 80 年代以来,人们对不含有氯元素的 HFCs、HCs 替代工质的蒸气机械压缩制冷技术开展了大量的研究工作,已取得一定成效并开始获得应用。但近 20 年来所开发的制冷工质(如 R134a、碳氢化合物等)仍不能彻底解决工质的环境问题(温室效应等)和安全问题(可燃性等)。采用自然工质的蒸气机械压缩制冷技术近年来获得重视,采用 CO_2 的跨临界蒸气压缩制冷循环正在加快研究开发。 CO_2 作为自然工质(ODP 为 0, GWP = 1),被认为是氟利昂制冷剂的长期替代物,可行性研究几乎涵盖了制冷、空调及热泵的各个领域^[12]。

随着能源紧张以及环境恶化形势的加剧,热驱动制冷技术和热泵技术的研究在近期获得了重视,是今后节能制冷研究的重要方向。在利用工业余热和太阳能方面,吸收制冷、吸附制冷、除湿空调以及热驱动热声制冷技术的研究十分活跃。在热泵供暖方面,特别是基于各种自然能源利用的热泵系统,如各类空气源、土壤源、太阳能和水源热泵系统及其综合利用系统等得到了广泛应用;但

是,热泵的运行工况比空调工况复杂得多,特别是应用面很广的空气源热泵,环境温度、水温都波动很大,使热泵在各种工况下稳定高效运行仍然有许多问题值得研究;同时,热泵供暖技术正朝着大温差、低温方向发展。热驱动制冷技术在热-电-冷联供总能系统中正发挥着关键作用。

与室温制冷技术相比,低温制冷技术(120K以下)在高新技术和国防技术方面有更多的应用,包括航空航天及空间探测开发(氢氧火箭发动机、卫星遥感遥测、低温风洞等)、国防军事技术(红外制导、预警、夜视、潜艇动力装置等)、信息技术(低温电子器件、量子计算和量子通信技术等)、生命科学(超导核磁成像MRI、SQUID器件、器官保存、低温外科等)、交通和能源(磁悬浮列车、LNG/LH₂汽车、超导储能等)、科学研究(低温液体、加速器、同步辐射光源、冷中子源、超导托克马克等大科学工程的低温系统等)、工业(空分、富氧炼钢、高低温环境模拟)等。长期以来,许多传统回热式低温制冷机因难于解决低温下运动部件寿命可靠性的问题,而限制了其大规模应用。脉冲管制冷是一种完全消除低温运动部件的新一代低温制冷方法,可以较好地解决可靠性问题。20世纪80年代以来,该技术取得突飞猛进的发展,先后经历小孔型、双向进气型脉冲管等许多重大改进,制冷温度成功地达到液氮温区。但脉冲管制冷技术尚没有得到大规模的应用,工作机理仍需要深入研究。无运动部件的热声发动机驱动的脉冲管制冷,可以进一步提高系统的可靠性,是低温制冷技术研究前沿。

我国制冷与低温科学工作者在研究和发展新型环保制冷技术、节能制冷技术以及新型低温制冷方面取得了举世瞩目的成绩,推动了我国制冷事业的快速发展。但是,总体上看,我国制冷与低温研究与国外先进国家相比还有一定差距,特别是在原创性方面仍显不足,研究工作多为跟踪与改进性;此外,在推进新型制冷技术的实用化方面也落后于国外先进国家的进程。

2.2.5 交叉学科

自1979年第一次世界气候大会呼吁保护气候以来,全球气候变化日益成为国际社会关注的热点。1992年《联合国气候变化框架公约》(简称《公约》)正式通过并开放签署,我国签署并获批准。1994年《公约》正式生效。1997年149个国家和地区的代表通过了《京都议定书》,它规定在2008~2012年期间,《公约》国家(发达国家和东欧经济转轨国家)的温室气体排放量要在1990年的基础上至少减少5%。2005年2月16日《京都议定书》正式生效后,国际社会各种多边或双边活动日益频繁,达沃斯论坛、G8+5峰会、中外领导人会晤都把气候变化作为重要议题。

在这一重大背景下,世界能源科学技术的研究范畴正从 20 世纪传统热力循环,逐渐转向能源和环境科学交叉领域。能源动力系统的温室气体控制正成为能源环境交叉领域的新热点问题,世界各国均启动了相应的研究计划以应对这一挑战^[20]。例如,今年美国能源部启动了 21 世纪远景计划 (Vision 21)、煤的转化利用总能系统 (发电、氢分离、生产化工产品多联产和分离回收 CO_2 等)、洁净煤技术 (CCT) 计划、先进发电系统和先进透平动力系统 (ATS) 等。美国在洁净煤技术方面资助的重点是先进的发电系统以及与发电有关的污染控制技术,前 3 轮主要针对减缓酸雨的技术;第 4 轮与第 5 轮主要考虑 2000 年以后的能源供应形势与需求,重视控制 CO_2 排放,要求把 CO_2 排放量控制在 1990 年水平,而电力需求又不断增加,必然要求煤炭的利用效率更高, SO_x 、 NO_x 、 CO_2 等排放更少。预计到 2050 年,新型系统的 CO_2 等有害物将实现准零排放、燃煤发电效率达到 60%、天然气发电效率达 75%。

欧盟推出的未来能源计划重点是促进欧洲能源利用新技术的开发,增加生物质能源和其他可再生能源的利用,减少石油的依赖和煤炭造成的环境污染,改善能源转换和利用的研究开发中,优先考虑减少污染排放及提高能源转换和利用效率。欧盟正在研究开发方向的有:整体煤气化联合循环发电,煤与生物质及废弃物联合气化 (或燃烧),固体燃料气化燃料电池联合循环,循环流化床燃烧,基于生物质能利用的负 CO_2 排放等。图 2.2 是欧盟正在研究开发的新型能源利用项目的示意图。

日本新能源综合开发机构 (NEDO) 在其新日光计划中开展了新能源释放方式的研究,如新型高温空气燃烧方式 (节能 30%, NO_x 降低 50%)、具有 O_2/CO_2 燃烧的动力循环等,以达到同时解决能源和环境问题的目的;开展了氢能的世界能源网络项目 (World Energy-Network) 研究,包括氢的制造 (电解、太阳能热化学制氢)、氢的储运、氢能的转化和利用 (燃料电池汽车及发电、氢氧联合循环) 三个部分;也开展了“煤气化联合循环动力系统”和“煤气化制氢”等研究,目的在于提高效率、降低废气排放,如超超临界蒸汽循环、流化床燃烧及煤气化联合循环发电、煤气化燃料电池联合发电技术、烟道气的脱硫脱氮等。值得注意的是,日本政府资助的经费正大量从煤的高效转换研究转移到全球温室效应方面的研究。

能源动力系统中控制温室气体的研究,不仅是具有基础性、前瞻性的研究方向,而且是能源与环境一体化,技术科学与管理科学的领域交叉的新兴学科。应该说,对于这一问题的复杂性与难度,国内外学术界在认识上尚未统一,大多数研究尚处于刚刚起步的阶段。

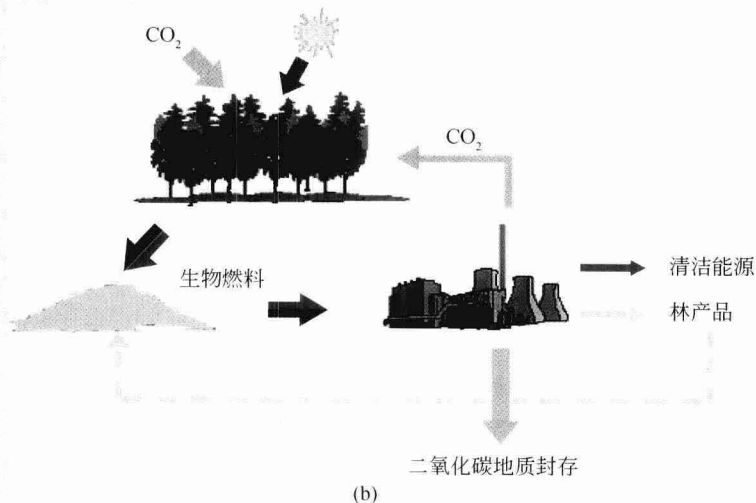
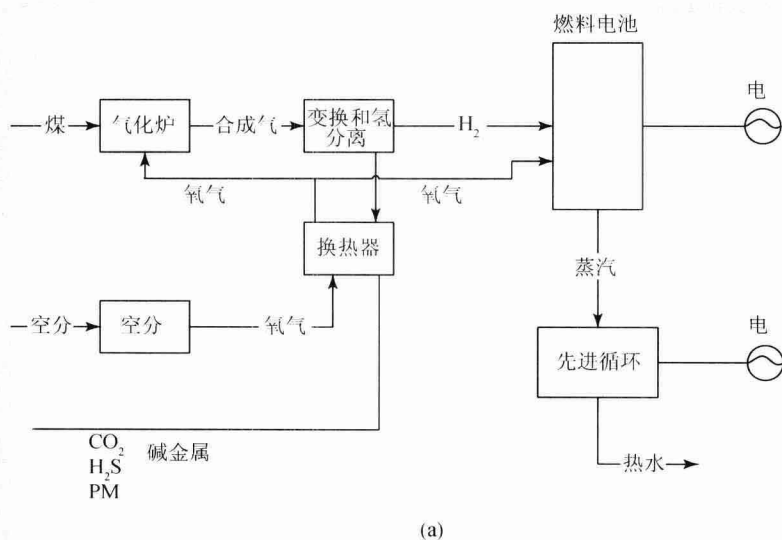


图 2.2 欧盟正在研究开发的新型能源利用项目

2.2.6 工程热力学的发展与比较分析

表 2.1 列出了热力学领域国际期刊发表论文情况的统计，包括与工程热力学领域相关度最大的 12 种国际学术期刊及其 5 年来在 SCI 中影响因子的变化情况。从表中可以看出，近年来这些学术期刊的影响因子稳步上升，共有 8 种超过 1。由于具有较强的工程特色，这些期刊尽管是相关领域中国际上著名的，但与其他

学科的期刊相比影响因子并不高。

统计 2001 ~ 2010 年上述 12 种期刊发表论文数较多的国家和地区情况, 见表 2.2。中国内地近 10 年来发表论文数量的变化情况见表 2.3。从表 2.2 和表 2.3 的数据可以看到, 2001 年论文数量由从前徘徊在 80 篇左右增长至超过 100 篇, 其后稳步增长, 2008 年已经超过了 400 篇, 10 年来发表论文总量排在第 2 位, 这表明了我国的科研工作正在迅速的发展, 成为一支重要的科研队伍, 在国际学术界有着日益重要的地位。

表 2.1 统计的 12 种刊物与 5 年来其影响因子的变化

序号	刊物名称	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
1	<i>Applied Thermal Engineering</i>	0.777	0.814	0.868	1.349	0.922
2	<i>Cryogenics</i>	0.762	0.927	0.981	0.915	0.987
3	<i>Energy-The International Journal</i>	0.685	0.935	1.172	1.712	2.952
4	<i>Energy Conversion and Management</i>	1.244	1.325	1.180	1.813	1.944
5	<i>Fluid Phase Equilibria</i>	1.478	1.680	1.506	1.699	1.857
6	<i>International Journal of Energy Research</i>	0.525	0.718	0.701	1.016	1.928
7	<i>International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid</i>	0.874	0.936	0.879	1.458	1.537
8	<i>International Journal of Thermophysics</i>	0.940	0.793	0.698	0.889	0.702
9	<i>Journal of Chemical and Engineering Data</i>	1.610	1.642	1.729	2.063	1.695
10	<i>Journal of Energy Resources Technology-Transactions of the ASME</i>	0.185	0.370	0.313	0.407	0.512
11	<i>Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A-Journal of Power and Energy</i>	0.325	0.392	0.201	0.609	0.655
12	<i>Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics</i>	0.500	0.635	0.644	1.085	1.227

表 2.2 12 种刊物上发表论文的主要国家和地区情况 (2001 ~ 2010 年)

国家 (地区)	中国	美国	日本	西班牙	德国	印度	法国	意大利	土耳其	英国	伊朗	韩国
论文数	3287	2747	1464	1218	1145	1115	1009	968	954	880	846	814
比例/%	15.2	12.7	6.8	5.6	5.3	5.2	4.7	4.5	4.4	4.1	3.9	3.9
排名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

注: 上述所列中国论文数仅是内地发表论文的统计。

表 2.3 中国内地 2001 ~ 2010 年发表论文数量的变化

年份	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年
篇数	125	146	169	192	252	343	399	431	547	683
比例/%	8.05	9.00	10.50	10.98	11.97	15.46	17.73	18.55	19.54	20.34

2.3 研究内容与科学问题

2.3.1 非平衡热力学及计算统计热力学

1. 非平衡态热力学

如前所述, 创建一个简便可行的能适应工程实践需要的工程非平衡热动力学理论具有重要的意义, 这是一个值得研究的课题。物理学家们就理论本身的完善进行探讨, 而工程领域的学者更多的是从实践课题的研究出发, 从实践中提炼丰富充实理论, 二者殊途同归, 相辅相成, 互相促进这一新学科的完善。在这方面, 国内外学者已做了不少工作, 但继续深入研究仍是不容懈怠的。

在理论研究中, 首先要解决的一个最基本的问题是远离平衡系统的状态和行为的 thermodynamics 描述问题。由于常用的 thermodynamics 状态参数 (p 、 T 、 u 、 s ……) 都是在宏观系统平衡状态下定义的, 在非平衡条件下只有在线性区当局域平衡假定得到满足时才能顺利地利用它们。为描述远离平衡系统的状态, 学者提出了不少建议, 如引入内变量, 定义“伴随温度”及“相伴平衡态”, 引入“条件熵”或“相对熵”的概念等, 有的学者甚至建议将温度 T 的时空导数 \dot{T} 及 ∇T 也作为描述系统状态的独立参数而引入到 Clausius-Duhem 基本 thermodynamics 关系式中。但问题并未得到一个公认合理的解决。

另外, 根据耗散结构理论, 当系统远离平衡时其 thermodynamics 和动力学行为方式会与平衡和近平衡区截然不同。在一定的外部条件作用支持下, 可能出现从无序到有序的转变, 形成有序化的耗散结构。这已有许多实际例子, 如生物韵律现象、化学振荡、Benard 对流花样、热流体波等。近来, 有学者在研究半导体等单晶体生长过程中, 在不同条件下, 当 Re 、 Ra 、 Ma 足够大时会出现各种花样的流动状态。直接影响到晶体的质量, 需要有效控制。目前, 这一研究由于其在理论上的价值及其在工程应用上的重要性正成为一个引起广泛关注的研究热点。从 thermodynamics 观点看, 这是十分典型的系统在远离平衡时的自组织现象和耗散结构, 但如何对此现象的分析提供更多的定量依据, 如失稳的条件和判据、准确的阈值的确定等

都是值得探索的问题。

非平衡态热力学问题出现在许多特殊体系和极端条件情况,如微尺度体系、高能量变换体系、超短时间作用体系、太阳辐射能作用体系。20 世纪 80 年代以后,随着微电子、人工超晶格、纳材料、微电子机械系统、生物芯片等技术的诞生和飞速发展,亚微结构的微电子器件、光电器件等不断出现。计算机的高速化使芯片受超高频率的冲击,大功率短脉冲激光加工技术的进展也同样使时间微尺度化,即以纳秒、皮秒甚至飞秒来计算引起所传输的能量与物质之间的相互作用。除了时间和空间的微尺度之外,在航天技术中会遇到重力微尺度,需要探索在地面模拟重力微尺度化的有效技术。目前,已经形成了“介观物理学”、“细观力学”、“纳材料科学”、“微尺度传热学”以及“纳电子学”等一系列崭新的科学体系。这些不同学科的共同特点是其研究对象都表现出微尺度下的一些“超常”现象,或者说都是以“微尺度效应”为出发点的。尽管这些学科还处于刚刚建立阶段,许多现象还需要长期深入的研究探索,但已经展现出良好的理论发展前景和孕育高新技术产品的巨大潜力,引起了人们广泛的关注和极大的研究热情。因此,掌握微尺度条件下热现象的特有规律成为非常迫切的任务。辐射能是一种重要形式的能量。太阳辐射能在地面的一切作用都不与太阳温度相等,这是典型的非平衡辐射热力学问题。目前的平衡态辐射热力学理论,不能描述开放系非平衡态的太阳能利用的问题,以至于还不能有说服力地解释“光合作用时是熵减过程”的违背热力学第二定律的错误原因。对于太阳能利用,建立非平衡态辐射热力学理论十分重要。

应用研究是多方面的,且尚在不断发展,仅就一些目前涉及的主要问题作如下阐述:

1) 相转变及界面现象

相变是工程上极为常见的现象,任何实际的相转变都是在一定的势差推动下产生的非平衡态不可逆过程。因此,在研究相变问题时,广义热力学驱动力($\Delta\mu$)与热力学流(质量转化率)之间的关系是一个最基本的研究课题。目前,在汽液相变中流体的极限过热度、过冷度的确定、汽化和凝结核心的形成、核化率的预测、汽泡(液滴)成长的规律及其对换热强度的影响、沸腾换热中临界热负荷的推算、结晶过程中主组元与杂质共晶的热力学驱动力以及最终各自的分布,混合与分离过程、高湿度空气的物性等的研究无不与相变过程有关。特别是在极端或特殊条件下的相转变(超临界状态下的汽化、微通道中的沸腾和凝结等),更是一些值得研究的新课题。再如熔化和结晶过程、玻璃态转变、在结晶中物质的物性改变及控制、分子设计等均存在不少关键性的热力学问题。特别是对多组分混合物或化合物的相转变的研究对新的相变材料的开发有十分重要的

意义。

界面现象是一种常见的物理现象，在工程上具有重要意义。例如，加热壁上气泡生长过程及脱离，在相转变中即不可避免地涉及界面问题。界面现象的研究涉及诸多方面：界面热力学、界面统计力学、表面张力、浸润性、吸附与脱附、胶体与流体的相互作用、表面汽化，非平衡系统中的界面动力学、界面热质交换、界面波，以及由界面温度梯度引发的热毛细对流等。因此，无论从静力学还是动力学的角度看，界面现象的研究都是十分重要的。近年来，它在许多领域，如化工、生物、制冷、热能工程等均有许多成功应用的例子，但它还需要理论研究的支持和应用研究的扩大。

2) 非平衡非稳定系统中的声传播

在非平衡系统中波的传播是一个伴有热传导、流体黏滞运动、弛豫现象（可视为一种化学反应）的含有标量、矢量及张量热力学力共同作用的复杂的不可逆过程，特别是对于多相系统或是过程中涉及相转变则问题更加复杂。例如，最近提出的“冷喷涂”（cold spray）新工艺，粒子在中温运载流体的携带下，在流道中进行跨音速流动，用高速击打喷涂材料的基板，使之黏结于其上，可以获得高致密度、高硬度、高黏着强度（可达90MPa）的高质量涂层。避免了高温，同时不改变材料原有的物性。它被用在燃料电池电极材料等的喷涂上，得到了较好效果。又如，在“变声速增压高效换热器”的研制中，利用气液两相流中的低声速及声速与相变率的关系，利用激波达到流体增压和强化换热的双重效果。采用理论计算与实验的结果表明，一定条件下超音速气液两相流升压装置的极限升压能力计算值可达进气压力的14倍左右，实验值可到进气压力的2.6倍左右。在这些对象的研究中，声波的传播规律、声速的确定都是至关重要的。由于声波是疏密波（纵波），波的极化、色散、声弛豫及其衰变规律都是甚为复杂且对过程产生重要影响，因此，这是值得研究的课题，有必要对此进行专项研究。目前，对气-液两相流中声速的确定已有一些报道，但对气-固介质中的声速研究报道较少，除实验外，非平衡热力学对此的理论研究已有所涉及，但需进一步深化。

3) 热动力学系统的稳定性分析

热动力学系统的稳定性分析是非平衡热力学中的一个很重要的内容。研究系统的稳定性有不同的方法，其中，线性稳定性分析用得较多。线性稳定性分析首先要求得到所研究的问题定态解析解，由于动力学系统的复杂性，获取解析解有一定的困难，故现在大多利用定态的数值解进行稳定性分析。即便如此，在分析中还要求解高阶广义特征值问题，从而带来一定难度和大的机时消耗，有时还得不到较精确的结果。在非平衡热力学中，根据李雅普诺夫稳定性理论，可利用

李雅普诺夫函数 V 和通过系统得到的 \dot{V} ($\dot{V} = dV/dt$) 函数的符号的异同来进行稳定性的判断。这一方法的实施在数学上遇到的困难是找寻一对合理的易于判定符号的 V 及 \dot{V} 函数,但在热力学系统中这一困难可以得到较好的解决,因为有的函数的符号性可以通过其物理性质得到判断(如熵产率 $\sigma \geq 0$, $\delta^2 s \leq 0$ 普适判断 $d_x S/dt \leq 0$ 等,它们在非平衡系统中均为定号函数)。这样,我们可以选择它们为 V (或 \dot{V}) 函数进行稳定性分析,找出失稳条件和临界参数,而无须求解高阶特征值等。这一方法已成功地应用在一些工程实际问题分析上,如在热流体流动和传热传质耦合过程中的应用。在微重力条件下,熔体自由表面上因温度梯度导致的表面张力梯度会诱发 Marangoni 对流,且在某些参量超过阈值时,由于系统处于远离热力系平衡的状态而会出现自组织现象,呈现典型的耗散结构,从而影响产品的材质。这一现象在材料制备中的特殊重要性,已成为工程热物理与材料学科结合的极具研究前景的学科结合点和研究热点。目前已有不少利用线性稳定性分析来研究此类问题的例子,也有少量利用李雅普诺夫方法的例子。这是一个值得进一步研究的问题,可望得到一些对丰富非平衡热力学理论以及对工程实践有重要指导意义的成果。

4) 混沌运动及分形

人们对运动的描述不外乎两种类型:一类是确定型描述;另一类是随机型描述。但在对确定型非线性系统的研究中,人们却发现输入的激励是确定型的,而得到的却是随机性的响应。这样,人们发现自然界中除平衡、周期、概周期运动状态外,还存在着一种貌似随机的始终有限的定常运动,称之为混沌运动。在非线性的力学中,混沌运动早已是人们颇为关注的课题,但在热学领域报道较少,关于 Lorentz 系统及 Benard 对流中的混沌运动已有文章涉及。例如,在 Benard 对流中,无运动向有运动的转化,有序的流动花样向混沌的转化,混沌运动向湍流的转化,使人们似乎见到了这种转化的内在机制。混沌是关于过程的科学而不是关于状态的科学,是关于演化的科学而不是关于存在的科学。当系统热过程向非平衡态演化时,混沌的研究常常是不可避免的。至于混沌运动理论的引入会对热科学带来什么样的影响,暂时还是难以估量的。

分形与混沌的起源不同,发展过程也不相同,但这两门学科的本质与内涵注定了它们必然会紧密地联系在一起,它们的研究内容从本质上讲有极大的相似性。

与欧氏几何不同的是,在分形几何中最基本的元素(如欧氏几何中的点、线、面、体)不能直接观察到。应该说分形首先是一种“几何语言”,它是由算法和数学程序而不是由什么原始形状来描述的。这些算法借助于一些计算机程序

被转化成一些几何形态。但所有的分形不论如何繁杂多样，都具有一个重要特征，即可通过一个特征数，也就是分维数去测量其不平整度、复杂度或卷积度。分维数的微小变化可以引起形状的急剧变化。在热学领域，有许多分形的例子，例如，汽液界面具有分形特性，多孔介质可用不同维数的分形体来描写，利用分形理论研究土壤的导热系数、沸腾换热等国内外均有报道等；又如最近在研制中的石墨泡沫材料，它具有重量轻、导热系数高、比表面积大等优点，是一种很具有发展前景的材料，也是一种典型的分形体。在已有的研究中，对如何确定其分形维数及分维数与导热系数的关系等研究已有初步成果。又如在分子模拟中的分子运动，其运动轨迹是典型分形的，布朗粒子运动的分维数为2，而在不同情况下粒子运动的分形维数及对热过程的影响还是一个值得研究的课题。

2. 计算统计热力学及分子模拟

在分子模拟中，应主要解决三个方面的问题：一是计算模型的选取（主要是确定势函数模型）；二是模拟方法（包括一些简化、假定、技术法则以及运算方法）；三是统计方法（需要借助统计理论从大量统计样本中提取所需信息）。

1) 关于势函数问题

势函数的确定是进行分子模拟的前提，虽然目前对不同的对象已提出了不少势函数模型，但对大量的物质，特别是较为复杂的物质尚缺乏适当的势函数。从宏观热力学知道，物质在一定程度上存在着物性的相似性，因而可以用一些近似的通用方程（如通用状态方程等）来对某一类物质的特性进行描述。因此，是否存在某一类物质的近似的通用势函数，如何将宏观的热力学相似性与微观相似性结合起来，从已有的宏观相似性规律得到微观相似性规律，充分利用在宏观研究中所得到的知识再探索、推断相应的微观信息和规律，这是一个分子模拟中的有趣的反问题，值得进一步研究。其实，对于两参量状态方程，如宏观的 van der Waals 状态方程与微观的 $L-J$ 势函数之间的相互联系已有研究结果。证明其通用对比参数 p_{cr} 、 V_{cr} 、 T_{cr} 与 ε 、 σ 之间可以建立一些普遍的关系式。对复杂流体也可按照上述思路，开展进一步探索。

2) 混合物及多相、多尺度系统的分子模拟

混合物的分子模拟涉及混合规则的确定。而多相、多尺度系统（如纳米流体、沸腾和凝结）的分子模拟尚处于初期阶段，特别是涉及多相系或存在相变，其问题更复杂，这些问题在工程上急待解决，如工程中常见的沸腾和凝结问题，涉及不同尺度问题。连续介质模型的控制方程无法模拟蒸汽如何变成液体的过程，必须采用分子动力学模拟的方法。已有一些利用分子动力学模拟方法、格子-玻尔兹曼方法进行研究的报道，但研究工作尚处于初期阶段，有待

进一步发展。

3) 关于输运系数的研究

金属有机骨架材料是一大类纳米多孔材料,具有极大的表面积和可控的孔径,为气体分子的吸附应用提供了极好的基础;它在吸附和化学分离技术方面,比传统的纳米材料具有更多的潜在优势,近年作为新型的储氢和甲烷材料,得到研究人员的广泛关注。目前气体在金属有机多孔材料中吸附行为的微观机理还不清楚。利用分子动力学模拟方法研究气体在多孔材料中的选择性吸附特性是一个行之有效的方法,特别是在新开发的材料特性研究上,分子动力学模拟方法提供了一个较为简而易行的手段。但不可否认的是,由于在模拟过程中许多细节问题存在不同的处理方法,所得到的数据尚比较分散,同时与实测值的偏差也比较大,故尚有较大的研究和探索的空间。工程实践的需求将迫使我们努力地去解决其中的问题。

4) 流体分子与固体表面和功能材料间的相互关系

这一问题的研究在工程应用上具有重要意义。这一问题在催化反应、表面吸附与脱析、冷喷涂、沉积现象、微通道等多孔介质内的流动、混合、分离、沸腾与凝结相变、燃烧等热过程的分子动力学模拟中均涉及,特别是具有不同功能的微通道表面性质、表面几何特征对流动、混合、分离、沸腾与凝结相变、燃烧等热过程的影响更值得关注。目前,在发表的文献中,对问题都做了不同的简化和处理,因此其结果也难于相互比较,研究工作有待深入。

5) 受限空间内生物或高分子的热行为

这一问题的研究在医学和生物质能的开发利用上具有重要意义,如在生物芯片技术应用中、生物细胞的分离等。在外部能量作用下,从微观角度研究物质高分子链的分子结构热稳定性,分子链结构失稳、分解和破坏机理,目前这方面的研究有较大的探索空间。

6) 量子效应的考虑

在纳米尺度上,量子效应已不能不考虑。从头算法(ab initia calculation)即是从第一原理出发来考虑分子间的相互作用,其目标是利用 Schrodinger 方程来确定分子的特性。特别是确定在势函数中与多极距和极比率相关的系数,可望得到更为精确的势函数。量子效应的发生在研究许多热物理过程如热传导、热辐射、化学反应等中是不可避免的。在军事领域中,新发展的目标隐身技术涉及吸波材料热电磁量子特性的研究。

7) 模拟方法及统计方法的研究

模拟过程包含许多细节,如势函数的截断、周期及非周期边界条件的设定、系统的选择及约束条件的调控等均对模拟结果产生影响。研究者希望模拟系统尽

量接近实际的情况,模拟系统尺度的增加,必然要求计算机性能的提升,开展有效的计算机并行计算方法十分必要。同时,对模拟结果(大量样本)的处理和利用,即如何从中获取尽可能多的信息,也是统计方法的拟定,都是一些值得研究的问题。虽然现有文献中也有不少论述,但尚需进一步进行研究。

2.3.2 热物性

热物性学主要研究流体和固体材料在各种温度压力范围下的基础热物理性质,包括流体(含纯工质和混合工质)PVT(x)、饱和性质、焓、熵、临界参数、比热容、声速、表面张力等热力学性质;流体及固体材料的导热系数、黏度、扩散系数、热辐射率、吸收率等输运特性;生成焓等热化学性质;分子间力、势能函数、偶极矩等分子参数;建立宏观性质与微观特性的联系等。研究方法包括实验测试、理论探析和日益成为热点的计算机模拟等。实验测量是热物性研究的基础,理论推算可从总体上把握一类物质的共同特性,利用计算机模拟的方法来获取物性数据是随着计算机技术的发展而产生的,尽管整体还处于起步阶段,但已表现出很好的应用前景。三种方法各具优势和特点,可以实现互补。热物性学的主要学科内容包括:

1) 新工质热物性研究

全球气候系统变化是目前国际社会普遍关注的热点,气候变化将深刻地影响人类社会的发展与进步。提高能源利用率,减少温室气体排放,研究环境友好型新技术,发展新型动力循环与制冷循环以及研究可再生能源等清洁能源是当前解决气候变化的主要途径,而在这些途径中必不可少的是对工质的热物理性质的全面认识和掌握。国内外学者在新工质的热物性研究领域已经开展了大量工作,在保护臭氧层及减小全球变暖的过程中起到了显著而积极的作用,然而已有的部分替代工质仍具有相对较高的GWP,有些物质在应用中也面临着安全性、技术性 or 环境相容性等方面的问题。所以新工质的研究不仅是科学进步、社会发展的基础,也是一个长期过程,研究环境友好、能效高的新型工质,获取可靠、精确的热物性数据,探索新型工质在技术应用中的科学问题与物理规律,是当前热物性研究领域需要继续关注的重要内容。

2) 热物性实验方法

实验方法是热物性研究的重要手段,精确的实验数据是理论研究和计算机模拟的基础;实验推动了重要的科学发现和理论的创新。发展精确的实验测量方法和技术是热物性学科发展的内在需求,精确的实验数据是热物性理论发展和深化的重要基础,也是能源动力领域的有效工具。

不断发展新的高精度的热力学性质和输运性质测试方法是热物性学研究内在

的要求,混合工质热物性的测试提出了很多不同于纯净物的新的科学问题,需要我们去深入探索和提出新的解决思路。依靠声学、光学、电学测量发展的新技术也不断在热物性测量中得到应用并完善,如声-热、光-热测量流体热物性,热物性测量自动化及虚拟仪器技术和微机电系统(MEMS)技术的应用,在线测量系统的开发等。声速高精度测量的发展值得关注。国际温度咨询委员会推动的在通过重新测量玻尔兹曼常数来定义热力学温度(K)的研究中,就是利用简单流体(如Ar、He或Kr)气相声速的精确测量来实现。声速的高精度测量不仅可以获取声速实验数据,而且还可以导出理想气体比热容、维里系数、定压(容)比热容、压缩因子、等温膨胀(压缩)系数及等熵膨胀(压缩)系数等热物理性质,这对热物性测量、状态方程建立以及工程需求无疑有着重要的意义。基于声学法还可测量介质的黏度,实现混合物组分浓度的在线测量。采用微波干涉法测量介质的介电常数和折射率等前沿研究也在积极开展;微波干涉法还成为新一代热力学温度测量手段的重要选择。

现代科学技术的发展对热物性提出了很多新的要求,发展复杂和极端条件下热物性测试技术需求也很迫切。

3) 热物性理论研究和计算机模拟

基础理论的新发现对于热物性学科发展具有重要推动作用,在热物性学的理论中也在不断引入其他学科的最新理论和发现。工质热物性理论推算方法可让我们从整体上把握某一类物质热物性的总体规律,依据已知推算未知,深化对微观物质结构和分子间相互作用的认识。

热物性理论推算方法主要有两类:一类是根据分子结构特征,如分子中碳原子数、官能团等计算纯物质的某些参数;另一类被普遍看好和广泛使用的方法是对应态理论为基础,从物质的相似性出发,找出各种物质共性和个性关系的对比态方法。结合理论物理学、量子力学等学科的最新进展,进一步提高理论推算方法的精度和适应范围,特别是发展适用于混合物热物性预测的新理论估算方法,这仍是摆在热物性学者面前的挑战。作为关联和描述工质热力学性质的重要手段,状态方程的研究已成为一个相对独立的研究方向,高精度、解析型状态方程、经验型状态方程(特别是立方型状态方程)、理论状态方程等是近期的研究热点。

流体物性计算机模拟通过计算电子结构和分子间相互作用力,利用统计分析方法获得流体物性。代表性的模拟方法主要有分子动力学模拟、蒙特卡罗方法和Ab Initio方法(或称第一原理,first principle)。用流体物性的模拟,还可以起到检验理论的正确性、模拟极端状态和条件下的热物性数据,填补如极高温度、极高压或剧毒等极端条件实验测量困难遗留的真空等作用。

4) 工程热物理与能源利用学科发展对热物性研究的需求

适应能源、环境与经济的协调、可持续发展的高效洁净能源转换利用技术和系统,包括能量梯级利用方式、新型热力循环、热力系统热经济性评价及性能优化等,它都对热物性研究提出了新的要求,急需提供各种热力性质的精确热物性数据和计算方法。煤基能源多联产系统作为一种多输出的能源资源环境一体化的系统,往往复合了甲醇、二甲醚合成等复杂的煤基化工过程,化学反应、合成、分离等流程往往是多组分、多相的复杂系统,热物性正是进行理论分析、工程设计、设备选用、流程优化等必不可少的基础,也是系统构建的关键基础问题之一。碳捕集与储存(CCS)是降低碳排放的重要途径之一,已引起国内外学者的广泛关注。在 CO_2 捕集、压缩、输运及储存过程中, CO_2 的热物性是系统设计、安全、节能运行的重要基础。由于 CO_2 的临界温度较低,在应用领域经常处于近临界和超临界区,对其近临界和超临界区热物性的深入了解至关重要。目前已有的状态方程并不能精确表征近临界和超临界区 CO_2 及其混合物的热物理性质,不同方法得到的计算结果差别较大。因此有广泛工程应用的 CO_2 及其混合工质的热物性测量有着突出的时代意义。热物性研究也是许多新型制冷循环的关键基础问题之一,如跨临界的 CO_2 制冷循环、离子液体吸收制冷循环等。此外,新能源技术的发展也大量需要热物性研究的支撑。石油替代燃料的研究急需各种新燃料及其混合物的热物性数据。在氢能利用,如超临界水生物质制氢、人工酶制氢、光催化制氢等;蓄冷蓄热技术,如混合盐蓄热、气体水合物蓄冷等;太阳能热利用;潜艇AIP系统的尾气处理; CO_2 捕集中利用离子液体吸收 CO_2 ;功能流体强化传热;纳米生物热物理研究等领域,均涉及新工质(包括生物质)和混合工质的基础热物性问题。

2.3.3 热力循环及总能系统

热力循环及总能系统的发展战略目标是:①继续加强基础理论研究,注重学科交叉和领域渗透,争取在若干有相对优势的方向跻身于世界先进行列。②基于节能优先的国策,注重能源发展和应用中的关键问题,以解决阻碍社会、经济发展的长期“瓶颈”问题,发展与开拓科学用能的途径与方法,使常规化石能源,特别是煤炭成为高效、洁净、稳定、廉价的能源。③为推动可再生能源发展及其关键过程的研究,以不断改善我国能源消费结构和加快能源结构多元化,建立可持续发展能源系统。④加强能源转换的物理化学生物学基础研究,为煤炭洁净利用、石油战略储备、电能蓄存、生物质能开拓等奠定科学基础。

面向可持续发展的绿色能源战略背景,热力循环研究的总目标定位在解决能源利用与环境之间相容协调的难题,即不断提高能源利用率并减少污染上,其主

要科学问题为：①将梯级利用的概念引入化学能及化学能向物理能转化，实现化学能与物理能的综合梯级利用；②多功能综合新思路，试图打破独立循环系统各自发展形成的提升热力与环保性能的障碍，实现不同用能的循环系统有机联合；③寻求关键技术、材料、工质等突破，实现更高层次的循环系统集成，例如，研究燃料化学能与物理能综合梯级利用的新方法，以及研制高性能的关键器件，提出多能源品位互补新方法和关键技术，研发低能耗 CO_2 捕集的功能材料与介质等。

热力循环与总能系统研究的主要内容有：

1) 能的梯级利用与热力循环创新

热力循环是能源动力系统的基础框架。现已实行的最主要成果是把适合较高温区运行的 Brayton 循环与适合较低温区运行的 Rakine 循环联合匹配的燃气蒸汽联合循环，其最高实用效率已接近 60%。即便如此，常规联合循环依然存在顶底两循环之间平均传热温差较大的问题，还有提高效率的潜力。对此提出一些改进建议，例如，Kalina 循环、HAT 循环、ABC 空气循环以及氢氧联合循环等，还应加强相关理论研究，以强化创新基础。

2) 能量释放的新机理

在传统的化石能源动力系统中，燃料化学能是借助燃烧技术以热的形式释放出来，再通过热力学循环实现热转功、输出有效功的。化石燃料燃烧能量释放方式的研究进程相应可分为三个阶段：最初是能烧完就行，不管污染；接着是主要解决燃料化学能高强度、高效率释放的问题；近年来重视环保问题，对清洁燃烧以及其他能源洁净利用措施的研究得到了巨大的推动。传统火焰燃烧方式不仅造成巨大的可用能品位损失，而且还是系统有害排放物的主要产生源。打破传统火焰燃烧方式，寻求新的燃料能量释放机理或更富创新意义的途径，将成为同时解决能源效率和环境污染两大问题的一个科技关键。目前，第三阶段正在积极探索研究的新型能量释放机理，主要有无火焰燃烧、部分氧化、高温空气燃烧、新型化学链反应燃烧等。这些都有可能降低化学能释放侧的品位，减少燃烧过程能量的品位损失和有害物质量。

3) 中低温能源转换利用与正、逆向耦合循环

在中低温工业余热和可再生能源（太阳能、地热能等）转换利用过程中，热源的温度都比较低（ $100 \sim 400^\circ\text{C}$ ），中低温能源高效、低污染利用的热力循环受到特别的重视。鉴于热力学循环固有特性，中低温热源热功转换效率很难提高，这其中的关键科学问题有：①中低温热源热能品位的提升（将较低温度的热能转变成较高温度的热能，从而提高利用价值）；②特殊工质（混合工质，共沸工质，非共沸工质，离子液体吸收工质）循环匹配特性；③循环系统的集成原

理, 新颖的逆循环及正逆耦合循环系统等。

正逆耦合循环的应用表现在三个方面: 首先, 利用正循环中的中低温余热驱动吸收式逆循环制冷, 组成冷热电联供分布式能源系统; 其次, 将余热产生的冷用于混合工质动力系统的冷凝过程, 提高系统的热效率; 再者, 正循环中的中低温余热驱动吸收式逆循环制冷, 用来冷凝部分 CO_2 工质。这种正逆耦合循环与液化 CO_2 过程的结合, 会减少压缩耗功, 实现冷能与 CO_2 分离的一体化。

4) 全工况特性的总能系统集成机理

传统能源动力系统特性的研究多局限于热力特性和设计工况, 系统优化集成的主要目标是提高热力性能。随着总能系统向复杂化、多样化的发展, 传统的热力系统特性研究的思路和方法面临着新的挑战。由于运行条件和外界负荷等不断变化, 总能系统中热机与热力系统总是在偏离设计基准的变工况下运行, 尤其是对于分布式冷-热-电等联产系统, 传统的单纯热力性能指标已不能全面描述系统的特性。因此, 研究系统全工况高效、经济可靠运行的特性规律, 提出能够科学描述总能系统全息特性的评价方法; 认识和揭示冷-热-电联供系统设计集成下能的综合梯级利用与变工况特性的关联现象、演变规律, 创新的蓄能机制与方法对冷-热-电联产变工况特性的影响; 研究基于全工况特性的系统模拟分析新方法等, 都是总能系统集成的关键科学问题, 这些问题的解决对于总能系统集成理论和应用的发展都起到关键性的作用。

5) 热力系统的建模和仿真

在经济快速增长、化石资源日益短缺、能源安全问题突出的今天, 热力系统本身的内涵和特性正在发生变化。传统意义上的热力系统日益演变为具有新内涵的现代热力系统。传统热力系统的主要特点是: 以化石燃料为原料, 以动力和热能为产品, 内部过程以热力循环为核心, 主要涉及物理能的转化。相对于传统系统, 现代热力系统的新特征及其涉及的主要研究内容包括如下一些方面:

(1) 在能源来源方面, 可再生能源(风能, 生物质, 太阳能等)正在成为新的、快速增长的一次能源; 传统化石燃料(煤、油、气)和可再生能源之间由以往的单独利用方式向交叉和综合互补利用方式发展。

(2) 在系统输出产品方面, 多产品、多联产成为发展趋势。这种多产品不仅是传统热力产品(动力、热能等)和冷能、灰渣等易得产品的简单联供, 而且是向多联产的方向(燃料和化工产品的集成联合生产)发展。在温室气体日益成为关注热点的情况下, 高浓度二氧化碳实际上也成为各种热力系统的重要产品。

(3) 在内部过程和学科内容方面, 物理能的高效转换过程不再是唯一的核

心内容, 化学能和物理能的综合梯级利用以及热力过程和化工过程的耦合与集成

正成为主要的研究内容。此外,与热力系统运行、维护、可靠性、可用率等相关的科学问题,以及关联的技术性能、投资造价成本、最终产品成本的经济性评价方法也是现代热力系统研究中的重要内容。

(4) 在研究对象的层次和规模方面,现代热力系统的规模日趋扩大,成为复杂巨系统。传统热力系统一般包括过程、设备和系统三个层次。出于提高能源利用效率和实现循环经济的目的,现代热力系统的规模在向纵向和横向两个方向扩展:纵向是以能源梯级利用为特征的单厂生产过程的延长和扩展(如IGCC扩展为多联产);横向是单个工厂向生态工业园区的演变。

(5) 在适应经济和社会发展方面,开始在更广阔的地域、更长的时间尺度以及国民经济层面上探讨能源的合理、高效利用问题。传统热力系统的研究范围往往局限于“厂”的层次,在一个小的技术系统内探讨提高能源效率和综合优化的问题。然而,在快速工业化和城镇化背景下,能源面临的最大的挑战是如何利用有限的资源,在需求不断增长、能源系统不断扩大的新局面下,为社会和经济发展提供充足而经济的动力、燃料和热能供应。这实质上是在更宏观的层次上,考虑能源系统如何规划、设计、运行和发展,来满足和社会、经济协调发展要求的问题。现代热力系统是构成整个能源系统而且穿插在其各个组成环节内部的重要组成部分。因此,现代热力系统的研究范围不仅包括单一技术系统,而且必须扩展到城市、区域甚至国家层面上,从技术角度探讨能源系统的综合优化问题。

(6) 在学科基础和研究方法方面,在热科学理论尤其是工程热力学作为基本理论和方法论的基础上,需要融合系统工程、控制工程以及信息技术的理论、手段和方法来进行系统的分析。

结合上述特征和研究内容,热力系统建模和仿真需要加强研究的科学问题主要包括:

(1) 各种新型热力过程和设备的机理、特性知识和规律认识。从复杂和繁多的子过程(partial aspects)特性规律中简化和提炼出系统层次研究需要的主要规律和特性,并将其按照重要程度、因果关系和先后次序组合成满足系统特性研究需要的过程和部件模型,这是热力系统建模和仿真研究的科学问题。

(2) 复杂热力巨系统的抽象理论和方法的研究,包括适合系统描述、求解、分析和优化的、以多输入多输出形式表达的热力系统模型架构的建立方法;对象系统的“研究—开发—建设—运行和维护—退役”全生命周期的多产品、多准则、多目标的评价方法和指标体系;多目标和多情景的比较和优化的理论和方法;以改进系统性能为目的、关联评价指标和系统及部件技术和流程选择、设计和运行参数选取的特性规律的认识等问题。

(3) 除上述谈到的部件层次和系统层次的建模、分析、评价和优化的一般科学问题外, 动态特性研究的科学问题还包括: 动态模型的特殊建模方法, 描述热工质压力和流量耦合特性的热工流体网络建模和求解方法, 为满足实时或快速仿真或控制方案研究要求的模型简化和实时化、快速求解方法; 非线性、大延迟、非同性复杂热力系统的全工况描述方法等。

6) 热力系统的控制

热力系统的控制是确保热力系统按预定方式运行的重要手段, 也是保证热力系统安全、经济及环保运行的重要途径之一。随着热力系统向大型化和复杂化方向的发展, 热力系统的滞后性、时变性及非线性等因素影响着热力系统的控制质量。如何有效提高热力系统的控制品质, 有许多基础性的热工控制理论问题值得研究, 例如: 适用于热力系统大滞后特性的先进控制理论与策略的研究, 热力系统的全工况自适应控制理论与策略的研究, 基于热力系统整体非线性模型的全局优化控制理论与策略的研究, 热力系统的智能控制理论与策略的研究, 新型热力对象的基础性控制理论问题的研究等。对这些热工控制理论问题的解决, 是有效提高热力系统控制品质的关键。除此以外, 以往的热力系统控制主要是追求控制系统本身的技术指标, 随着国家对环境保护的日益重视, 融合控制技术指标和低排放环保指标的新型热工控制系统及其相关的基础控制理论也是重要的研究方向。

2.3.4 制冷与低温工程学

概括地说, 制冷与低温工程学的研究主要包括两个方面的工作: 首先是研究低温的获得方法, 其次是研究低温应用中的科学问题。其中, 低温的获得是制冷与低温工程学的首要任务, 也是学科的研究重心所在。制冷方法多种多样, 其工作原理不尽相同, 主要包括蒸汽机械压缩制冷技术、气体制冷技术、热驱动制冷技术、固体制冷技术等。这些制冷方法中, 有的已有上百年的研究历史, 并在工业生产中获得了广泛的应用, 但是目前遇到了新的挑战, 产生了一些新的科学问题; 有的虽有一定的研究历史, 但相对来说还很不成熟, 有许多的基础问题尚不清楚, 准确量的设计理论尚未建立。此外, 在制冷与低温技术的应用中及其与其他学科交叉中也产生了大量需要研究的科学问题。

根据制冷与低温工程学国内外的研究现状、发展趋势, 并结合我国国民经济发展和国家安全对学科提出的需求, 制冷与低温工程学科涉及的主要研究内容和科学问题包括:

1) 新型替代工质及蒸汽压缩制冷新循环的基础研究

(1) HCFCs、HFCs 等替代工质 (包括自然工质、混合工质等) 热物性及其热力特性研究;

(2) 高效 CO₂ 制冷循环的热力循环理论以及特殊流动传热研究;

(3) 高效蒸气机械压缩式制冷循环、热泵循环的创新及其热力循环工作理论;

(4) 深冷混合工质节流制冷技术的新工质热物性、热力循环理论(如内复叠制冷循环、分凝分离制冷循环等)以及其涉及的大温区多组元流动冷凝和流动沸腾特性研究;

(5) 蒸气压缩式制冷技术分析和设计方法的发展,建立可考虑动态特性和分布特性的制冷系统热动力学设计理论;

(6) 冷热综合利用,高效多功能新型热泵-制冷循环的研究。

2) 气体制冷和热声制冷技术的基础研究

(1) 热能与声能相互转换及能量输运过程的基础理论(热声学理论、气体微循环热力学理论、热声网络理论等);

(2) 可压缩流体在不同动结构中(多孔介质回热器流道、微细通道换热器、突变截面等)、不同运行条件(宽频率范围、高低温环境等)下的交变流动特性及传热特性的研究;

(3) 气体制冷新循环、新原理的研究和创新,建立和发展定量的热力学设计新理论,开展高频低温脉冲管制冷和行波热声制冷的工作机理、热声压缩机的热声动力学理论等方面的研究;

(4) 气体透平制冷技术的发展和基础研究,重点研究两相透平膨胀制冷以及微型逆布雷顿循环的热力基础。

3) 热驱动制冷/热泵技术基础研究

(1) 高效吸收制冷循环构型创新及其新材料(如工质对)的热力基础;

(2) 高效吸附制冷新循环、新材料(如新的吸附工质对)和新原理(如物理吸附与化学吸附复合循环)的基础研究。

4) 固体制冷技术基础

(1) 利用微纳米技术、量子效应的半导体制冷技术的物理基础及热力学基础;

(2) 高效室温磁制冷技术中的新材料及热力循环的基础。

5) 制冷与低温技术应用基础及学科交叉等

(1) 天然气、煤层气液化、储运及其应用技术基础;

(2) LNG 冷能利用的热物理基础;

(3) 新型空调制冷、蓄冷技术基础;

(4) 低温生物、医疗中的热理论和热技术基础;

(5) 低温超导和高温超导应用热物理问题研究;

(6) 2~4K 到毫开温度的机械制冷研究。

2.3.5 交叉学科

1. 化学能与物理能综合梯级利用原理

传统联合循环中能源有效利用的基本原理由吴仲华等在 20 世纪 80 年代提出,即能(物理能)的梯级利用原理,奠定了传统的燃气轮机总能系统的集成理论基础。迄今为止,总能系统的研究仍局限于物理能梯级利用范围(物理能的梯级利用大多所指稳流工质热的梯级利用),不涉及化学反应过程中化学能的能量转化利用问题。很久以来,直接燃烧几乎成为主要方式,存在的诸多弊端(如燃烧品位损失大、易产生环境污染物等)与能源环境相容协调发展相悖。随着能源科学和与其密切相关的环境、化工等学科的交叉与渗透,以及所涉及体系的复杂化,尤其是对于可包容多种能源、物流输入,并具有多种产出功能(如化工过程与热力循环整合)的能源与环境相容的多功能总能系统,传统的物理能梯级利用原理已不足以解决能源、化工、环境交叉领域内超出热力循环范围的科学问题。探索建立能够突破物理能梯级利用范畴的能量转化利用新原理已迫在眉睫。

与传统能源动力系统比较,燃料化学能与物理能综合梯级利用新概念突破了直接燃烧将化学能粗放转化为热能的传统能量释放模式,从燃料化学能做功能力的有序释放、定向转化出发,将燃烧前化学能做功能力的利用与热力循环有机耦合。它首先在燃烧前,通过不同的燃料转化反应,使燃料适度转化为二次燃料或化工产品,依据化学反应做功能力品位高低,进行燃料化学能逐级、有序转化,进而降低过程不可逆损失,实现化学能梯级利用;然后,难以转化的组分再燃烧完成热能的梯级利用。这种“燃烧前热化学反应”与“燃烧后热力循环”的耦合是实现燃料化学能与物理能的综合梯级利用的重要途径。图 2.3 是燃料化学能与物理能综合梯级利用概念示意图。重点与难点在于建立这种“燃烧前热化学反应”与“燃烧后热力循环”耦合后的化学能释放不可逆性减小的基本原理,寻求和发现能够实现燃料化学能与物理能的综合梯级利用的新方法。比较有可能获得突破的解决途径有:①热力循环与化工等其他生产过程的有机结合,探讨热能(工质的内能)与化学能有机结合、综合高效利用,即不仅注重了温度对口的热能梯级利用,且有机地结合了化学能的梯级利用,争取突破传统的联合循环的概念,以实现交叉领域的系统创新。②热力学循环与非热力学动力系统的有机结合,如尝试把燃料化学能通过电化学反应直接转化为电能的过程(燃料电池)和热功热力学循环的有机结合,实现化学能与热能综合梯级利用等。③化石燃料的热化学反应与热力循环的有机结合,如尝试甲醇、二甲醚等重整、裂解等化

学反应与热力循环的结合, 以实现替代燃料化学能与热能的综合梯级利用等。

④多功能的能源转换利用系统, 是指在完成发电供热等动力功能的同时, 利用化石燃料生产出甲醇、二甲醚等重要清洁燃料, 还可分离出理想的清洁燃料氢气, 进一步对 CO_2 进行有效的分离、回收和利用, 或者更进一步与各种化工生产过程紧密联产, 使动力系统既达到合理利用能源和低污染或零污染, 又能提供高效清洁能源, 从而协调兼顾动力与化工、环境等方面问题。

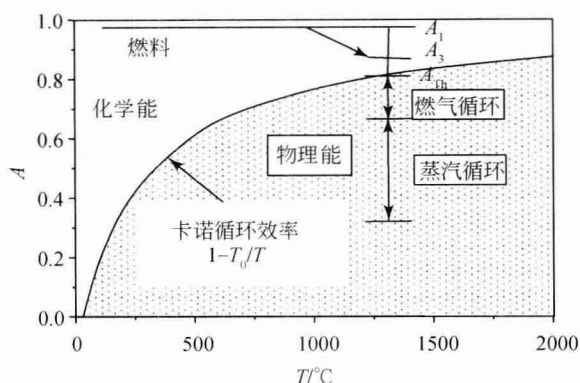


图 2.3 化学能与物理能综合梯级利用概念图

2. 热力学与温室气体控制

众所周知, 化石燃料具有较高的能的品位, 通过燃料燃烧等简单手段, 即可将其所蕴涵的化学能转化为热, 进而以热或功的形式加以利用, 它是人类社会发展的主要推动力之一。但是, 化石燃料中的主要成分之一为碳, 直接燃烧将释放大量的 CO_2 而导致大气 CO_2 浓度升高, 进而引发温室效应。由于其对人类社会威胁的全球性和严重性, 温室气体 CO_2 的减排控制已经成为一个能够对未来世界格局变化产生影响的重大国际问题。

CO_2 不同于传统的污染物, 由于量大且化学性质稳定, 简单沿用传统污染物控制的“先污染后治理”思路回收 CO_2 将导致不可接受的能耗, 最终造成奢侈的资源浪费、过低的能源利用率和不可容忍的环境污染。只有创新性地探讨和开拓, 才能够提出既能提高能源利用水平, 同时又能够解决环境生态问题的新型能源与环境系统, 摒弃传统的“链式串联”模式, 走出一条资源、能源与环境有机结合的发展新模式, 才能够解决控制温室气体的关键科技难题。资源、能源、环境一体化新模式技术路线如图 2.4 所示。

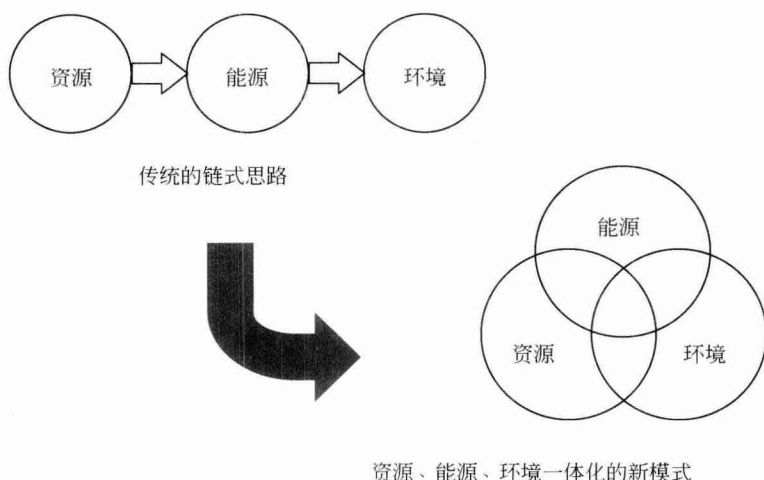


图 2.4 资源、能源、环境一体化新模式示意图

通常，根据热力系统与分离过程之间的相互关系，能源动力系统中的温室气体控制研究往往被分为燃烧后分离、燃烧前分离与纯氧燃烧等主要技术方向。热点研究领域包括通过系统集成提高分离前 CO_2 浓度，以降低 CO_2 理想分离功（烟气再循环），或降低 CO_2 分离过程不可逆损失以提高分离过程能量利用水平（如开发新型吸收、吸附工艺等）。相应的关键科学问题可以概括为：①动力系统与分离过程的相互影响关系及能的品位关联机理；②热力循环热能的梯级利用与 CO_2 生成、分离过程不可逆性减小的耦合机制；③非常规燃烧（富氧、富氢、富 CO_2 等）的燃烧稳定性、高效性与污染物协同脱除机理。

但是，上述研究方向的共同特征在于，热力循环与分离过程（ CO_2 分离过程或 O_2 分离过程）相对独立，通过能量与物质交换将热力循环与分离过程集成为一个系统，这种方式难以从根本上克服分离能耗对能量利用效率的影响，仍然没有完全摆脱“传统先污染后分离”的思路。

为了克服这一缺陷，目前新兴的代表性研究方向之一为“化学能梯级利用和含碳组分定向迁移一体化的温室气体控制研究”。能源动力系统温室气体控制研究的突破口在于，如何通过系统集成协调能量利用与 CO_2 的分离。燃料化学能的转化释放是能源动力系统中可用能损失最大的过程，也是潜力最大的过程，同时还是 CO_2 的生成过程。能量转化利用与 CO_2 分离一体化研究方向，将化学能利

用潜力与降低 CO_2 分离能耗结合在一起, 寻找实现能量利用与组分控制协调耦合的突破口。基于品位对口、梯级利用原则, 一体化系统力图实现燃料化学能的有效利用; 基于成分对口、分级转化原则, 一体化系统力图实现碳组分的定向迁移以降低甚至避免 CO_2 分离功。这一研究方向的代表性技术包括化学链燃烧循环、控制 CO_2 的多联产系统、 CO_2 及多种气体分离一体化系统等。这一研究领域的关键科学问题可以概括为: ①化学能转化释放过程中的能的品位变化规律与碳组分迁移转化机理; ②碳组分定向迁移与化学能梯级利用一体化原理; ③组分分级转化、化学能梯级利用与 CO_2 及多种气体低能耗分离一体化的能源动力系统集成。

从化工工艺革新的角度出发, 目前能源动力系统控制 CO_2 研究领域的另一热点方向为“反应分离耦合过程为核心的温室气体控制”。通过化学反应与分离的耦合, 化学反应能够通过改变组分分压影响组分扩散, 同时分离过程能够改变反应物或生成物的构成以控制反应平衡的移动。利用这一基本特性, 反应分离耦合过程正逐渐成为能源动力系统温室气体控制研究领域的新兴热点之一。通过物理和化学分离手段, 以反应分离耦合过程为核心的温室气体控制, 研究能够同时实现燃料的转化与 CO_2 分离的系统。这一研究领域的关键科学问题包括: ①反应、分离与化学能释放过程之间的物理化学作用机制; ②反应分离耦合过程不可逆性与燃料化学能梯级利用的协调原理; ③反应分离耦合过程与热力循环整合的系统集成。

综上所述, 能源动力系统 CO_2 控制研究正逐步向资源、能源与环境一体化的可持续方向发展, 涉及工程热力学、化学热力学与环境化学的交叉学科。

3. 多能源综合互补系统

鉴于化石能源资源的有限性及其利用过程产生污染的严重性, 开拓新的洁净能源资源, 特别是可再生能源总系统, 如太阳能热发电系统、生物质能源发电系统、风能发电系统等, 是保证可持续发展的一个重要方面, 也是可再生能源发展的一个重要研究方向。但多数可再生能源动力系统不稳定、不连续, 随时间、季节以及气候等变化而变化, 因此, 研究可再生能源与化石能源或水能等多种能源的综合互补, 特别是太阳能、生物质能、风能等与化石能源互补的利用系统, 就成为解决能源利用与环境相容难题的一个重要途径。

然而, 目前可再生能源与化石能源互补能量系统的研究处于起步阶段, 无论是在关键技术应用基础方面, 还是在互补系统构建体系的理论方面, 尚有诸多亟待解决的关键科学问题。问题主要包括: 不同品质的多能源互补过程的能量转化、释放新机理及新方法, 特别是太阳热能与化石燃料热化学互补的能量释放机理; 多种能源互补的总系统的能的综合梯级利用特殊规律, 多能源品位互补的热力学分析新方法, 多能源互补的能量转化与温室气体控制一体化协调机制 (如

控制 CO_2 的太阳能与化石燃料互补理论等), 创新的多能源综合互补的能源动力系统 (如中低温太阳能驱动替代燃料重整的发电系统, 燃料电池与太阳能联合发电系统, 微型燃气轮机与风力发电联合系统等)。由于多能源综合互补系统的复杂性与非线性更为突出, 故多能源互补总能系统的全工况动态特性的研究也更为重要。另外, 围绕相关新原理、新机理的关键核心技术的探索和研究与多能源综合互补的能量转化利用技术的发展也紧密相关。

2.4 近期优先领域和重点支持方向

工程热力学优先发展领域的选择应强调: ①紧密围绕我国社会、经济和能源科学自身发展的重大需求, 解决关系全局的能源结构、效率、环境、安全四大问题的基础研究; ②瞄准工程热力学学科前沿重大问题, 发挥我国的优势与特色, 体现学科深化和交叉、综合发展趋势, 或能在国际能源科学前沿占有一席之地的基础研究; ③有比较明确的目标, 支持能源高技术发展中的新概念、新构思、新途径等探索性研究, 以利于相关高新技术产业形成和发展。

根据工程热力学的国内外研究现状和发展趋势, 结合我国国民经济发展需求、学科研究基础和优势, 与国家“十二五”总体规划相适应, 并为相关学科发展提供必要的基础和支撑, 建议在中、近期着重加强下列方向和项目的研究。

2.4.1 非平衡态热力学及计算统计热力学

1. 重点支持方向

1) 非平衡热力学

- (1) 工程非平衡热力学理论的完善;
- (2) 微系统的热力学涨落理论关系;
- (3) 非平衡相变及界面现象的研究;
- (4) 热动力学系统耗散结构形成机制;
- (5) 吸波材料的热电磁耦合机制。

2) 计算统计热力学及分子模拟

- (1) 分子势函数的研究: 宏观相似性及微观相似性的关系, 利用宏观热力学相似发展适用于某一类物质微观分子作用的通用势函数;
- (2) 功能流体物性的模拟;
- (3) 功能固体表面特性研究;
- (4) 微尺度下受限空间内生物或高分子的热行为模拟;

(5) 模拟方法与统计方法的研究。

2. 近3~5年优先发展领域

1) 非平衡热力学

- (1) 微系统的热力学涨落特性;
- (2) 微系统中非平衡相变及界面现象的研究;
- (3) 热动力系统耗散结构形成机制及稳定性分析;
- (4) 吸波材料热电磁量子特性的研究;
- (5) 非平衡辐射热力学的研究。

2) 计算统计热力学及分子模拟

- (1) 势函数的研究: 宏观与微观的热力学相似性;
- (2) 一般及功能流体的物性研究;
- (3) 流体分子与固体表面和功能材料间相互关系的模拟;
- (4) 生物分子在受限空间的特性;
- (5) 混合气体的选择性吸附。

2.4.2 热物性

1. 重点支持方向

1) 新型环保替代工质的热物性研究

- (1) 新工质包括混合工质的热力学性质和输运性质基础数据的测定;
- (2) 反映热物性内在规律的数理模型、关联方程和高精度专用状态方程;
- (3) 混合工质状态方程和混合规则;
- (4) 热物性数据的评估体系和数据库建立。

2) 热物性基础理论

- (1) 热物性的理论描述和新推算方法;
- (2) 纯工质和混合工质临界区热物性的理论研究与跨接方程研究;
- (3) 流体分子热力学方法推算宏观热物性及热物性的计算机模拟;
- (4) 流体状态方程的改进与完善。

3) 热物性测试技术的发展和完善

- (1) 流体(包括混合工质)热力学性质和输运性质的高精度测试方法;
- (2) 基于声学、光学、电磁学等理论发展的热物性测量新技术;
- (3) 复杂和极端条件下热物性测试技术;
- (4) 流体热物性测量自动化及虚拟仪器技术和 MEMS 技术等的应用;

- (5) 复杂体系的动态湿润特性测量方法。
- 4) 环保、高效能源利用技术中的热物性基础问题
 - (1) 新型制冷低温循环工质的热物性;
 - (2) 新一代燃料和新能源利用中的热物性;
 - (3) 新型动力循环中的热物性;
 - (4) 新型环保建筑节能材料的热物性测量。
- 5) 温室气体减排领域中的热物性问题
 - (1) 近临界及超临界区 CO_2 及其混合物的热物性研究;
 - (2) CO_2 分离与捕集中的气液相平衡等热物性问题;
 - (3) CO_2 输送与埋存中的动态湿润特性等热物性问题;
 - (4) 温室气体的资源化利用中的热物性问题。
- 6) 其他相关领域中的热物性
 - (1) 微细结构和微纳米材料的热物性;
 - (2) 含纳米颗粒流体的热物性;
 - (3) 新型建筑材料的热物性;
 - (4) 航天相关材料的热物性;
 - (5) 生物体的热物性;
 - (6) 热电、光热磁热耦合作用中的热物性。

2. 近3~5年优先发展领域

- (1) 新环保工质(特别是 CO_2 、HCs 纯物质及其混合工质)的热力学性质和输运性质基础数据测量,热物性规律理论描述及理论推算方法;
- (2) 高精度专用状态方程、立方型状态方程和理论状态方程建模、优化方法及对混合工质的应用;
- (3) 基于声学、光学、电学等理论发展的热物性测量新技术、热物性测量的自动化与虚拟仪器技术和 MEMS 技术;
- (4) 流体热力学性质和输运性质计算机模拟方法的研究;
- (5) 微细尺度热物性测量方法、理论建模与分子动力模拟研究。

2.4.3 热力循环和总能系统

1. 重点支持方向

优先资助应面向国家战略需求和世界科学前沿的新热力循环研究方向,例如:①热力学与非热力学热功转换联合循环;②煤炭或天然气多联产联合循环;

③多能源综合利用循环系统（太阳能与天然气联合循环，微型燃气轮机与风力发电联合循环系统等）；④中低温能源转换利用系统与正、逆向耦合循环；⑤无公害燃煤联合循环（ CO_2 准零排放的 IGCC 和化学链燃烧反应无公害 IGCLSA 循环等）；⑥循环分析的新理论与方法等。

1) 热力循环

热力循环研究各种形式能量之间相互转换和合理利用的原理与应用，与动力工程密切相关，其重要性还在于普适和实用性，一直为能源科学基础的主要研究方向。

(1) 工程热力学，包括能的梯级利用原理与总能系统新概念，能源-动力转换过程的集成、综合优化，总能系统全息性能与规律，理论建模，热力学-经济学-环境生态学相结合分析法和多目标评价准则，煤炭、生物质能的多联产（电、热、合成气、液化燃料）系统和总能系统设计新体系等。

(2) 新型热力循环，包括基于新概念、新机理、新材料、新技术去探索发明新颖热力循环，开拓新一代发动机与动力系统。发展前沿有燃煤联合循环（CF-CC）、湿空气透平循环、新型核能联合循环、化学链燃烧反应动力系统（CLSAS），以及直接发电-热力循环相结合的多重联合循环（IGSOFC-CC、MHD-CC）等。

(3) 基础学科深化与交叉综合发展的热力学新分支，有非平衡、不可逆过程热力学，材料损伤热力学，热力学微观理论，热力学优化理论，能源利用仿生学，生物热力学等。

(4) 制冷与低温工程基础，包括新型制冷循环与系统、制冷剂的热力学性质以及液化天然气冷能的利用等。

(5) 中低温能源利用和储能的基础，包括高效用能系统理论、分布式冷热电联供系统、热泵与热品位转换新原理，以及中低温工艺余热与余压回收利用等。

(6) 热力系统动态学，包括新型热力设备和系统的动、静态建模理论和方法，复杂热力系统的抽象、建模、分析、评价和优化，热力系统先进控制理论与技术，热力系统及热力设备的安全控制、优化运行、状态检测与故障诊断，以及热力系统智能仿真实论、方法与工具。

2) 能源转化的物理化学基础

研究各种能源转化过程中的物理、化学或生物学的现象与规律，为开拓新型能源、储能、发电技术等提供科学源泉和支撑。其前沿课题有：

(1) 新型发电方式与原理基础，包括电化学反应直接发电，如燃料电池（MCFC、PEMFC、SOFC）；热与热离子直接发电，如磁流体发电（MHD）；生物质能发电，如仿生发动机、生物燃料电池、微生物发电。

(2) 新型储能机理，包括物理储能（水位势、空气压缩、超导及飞轮）、化

学储能（相变、浓度差、化学反应）、储能材料、高容量蓄能电池与电容器。

（3）煤炭转化的基础，包括煤气化和热解过程的工程化学和物理基础，煤液化过程的物理化学，煤层气、煤气转化为液体燃料的基础。

（4）新型能量释放机理，包括无火焰燃烧、部分氧化、高温空气燃烧、新型化学链燃烧理论。

（5）氢能，包括氢的规模经济制备，如高分子电解水制氢，分解水制氢的新型催化材料及热、电方法，等离子体分解制氢；氢的储运，如金属有机氢化物和无机氢化物储氢；高效洁净氢能转换利用系统，如氢燃料电池、氢内燃机、氢氧联合循环。

3) 热力系统的状态监测和故障诊断

（1）故障机理，包括热能动力系统故障机理；热力、机械和电气多种耦合故障机理；热能动力系统故障数学模型的建立；典型故障演变过程的建模与仿真；热能动力系统故障知识库的建立。

（2）故障检测，包括故障检测传感器的研究；故障检测、特征提取与新分析方法，小波分析、分形分析、混沌分析和其他非线性分析方法；多种传感器信息的并行处理分析方法。

（3）故障诊断，包括故障分类与诊断方法研究，神经网络、模式识别、专家系统、人工智能新方法等在热能动力系统故障诊断应用；故障预测诊断理论方法和新技术应用；基于多种信息耦合的集成故障诊断理论方法；复杂非线性热力系统的状态识别和预测理论。

（4）故障诊断系统，包括在线监测与故障诊断系统研究与应用，远程在线监测与诊断网络系统的应用技术；诊断数据库和知识库系统开发平台的研究与建立。

（5）先进的管理技术，包括热能动力系统的状态检修与管理技术规范化。

2. 近3~5年优先发展领域

1) 高效洁净能源-动力的关键基础

- （1）总能系统工程热力学应用基础理论；
- （2）总能系统优化综合与流程创新；
- （3）煤炭-动力能源系统全息性能与规律；
- （4）能源-动力系统计算机集成和动态仿真与控制；
- （5）传统燃煤电站的更新改造技术（如CC-repoering）基础；
- （6）冷热电分布式能源系统。

2) 燃煤污染防治和煤炭洁净转化的基础

- （1）硫、氮氧化物及其他污染物在燃烧前、中、后脱除的基础；

(2) 煤的热解、气化及高温净化过程的物化基础;

(3) 煤气化新途径(非常规)的物理化学基础;

(4) 煤液化过程的物理化学基础;

(5) 高温空气、部分氧化与无火焰燃烧;

(6) 煤的分级转化与多联产的基础;

(7) 煤层气、地下煤气化综合利用基础。

3) 中低温能源转换利用和储能的基础

(1) 绿色建筑能源;

(2) 新型储能(含冰蓄冷及电力调峰)机理与系统;

(3) 低温储能及其热力学和抽水蓄能流体力学与机械力学;

(4) 中低温能源利用系统的热力学基础。

4) 热力系统动态学

(1) 热力系统的新型建模理论,包括不确定性模型集建模和混杂系统建模;

(2) 时变环境下多联产能源系统及可再生能源与化石燃料综合互补利用系统的建模、评价与优化控制理论;

(3) 热力系统中流动、燃烧、传热等热物理过程的分布参数控制、主动控制及复杂非线性热物理过程的建模和控制;

(4) 热力系统动态数据知识发现方法及系统级状态监测和故障诊断。

2.4.4 制冷与低温工程学

1. 重点支持方向

我国的制冷与低温工程学的总体发展战略目标是:①瞄准学科前沿和研究热点,大力加强基础理论研究,探索新型制冷方法,提出新型制冷循环,建立和发展新的制冷技术理论和设计方法,争取使我国的制冷与低温技术研究在原始创新能力方面处于国际前列,为学科的持续发展做出应有的贡献;②紧密围绕国家经济发展和国家安全等方面提出的重大需求和迫切任务,大力开展节能制冷技术、替代工质技术、新型环保制冷技术和高性能低温制冷技术等的应用基础和关键技术问题,为我国的制冷与低温工业发展提供及时的、强有力技术支撑和保障。

中、近期应重点开展下列制冷与低温技术及其应用的基础研究包括如下方面:

1) 新型替代工质制冷技术

在完善现有几种重要替代工质的热物性研究以及热力特性研究基础上开展新工质的探索,近期的工作重点仍然应集中在混合工质物性及其制冷循环热动力特

性的研究。应加快跨临界 CO_2 制冷技术原理和应用的深入研究,包括带膨胀机、引射泵等高效膨胀机构的跨临界 CO_2 制冷循环的热力特性;超临界 CO_2 的传热特性、 CO_2 跨临界系统中微通道换热器的优化设计及制冷剂分配、亚临界压力下 CO_2 管内两相流动沸腾传热和压降特性等。

2) 新型交变流动回热式制冷技术

热声制冷、脉冲管制冷、斯特林制冷等具有可靠性高、环保等突出优点,是一类新颖的气体制冷方式,其内部工作机理十分复杂,热力设计理论很不成熟。主要的科学问题包括:热声效应和热声转换过程的热声学理论;若干非线性过程(包括热声自激振荡过程、热声声流、非线性声波传输等)的物理机制及其非线性热声动力学理论;自然对流与声场的相互作用机制及其对热声转换性能的影响规律;可压缩流体交变流动特性和传热特性,特别是回热器(多孔介质)交变流动特性的一般规律以及在高频、深低温下的工作规律;高效热声制冷流程的创新以及与两类驱动器(热声驱动器和电声驱动器)的耦合工作机理等。借助先进的热物理测试技术(热线风速仪、激光多普勒测速仪以及粒子成像测速仪等)以及跨尺度的计算模拟方法是重要手段。

3) 热驱动制冷技术

应该大力研究采用太阳能以及工业余热驱动的制冷技术,主要包括吸收/吸附制冷技术、喷射制冷技术、热驱动热声制冷技术等。研究重点在于适合不同热源的高效制冷循环的发展与创新、混合吸附/吸收机理以及小温差强化传热技术,吸附/吸收制冷系统中能量调节与高效传热传质,吸附/吸收制冷系统能量优化与特性匹配等。此外,以 CO_2 为工质的物理吸收制冷或者化学吸收制冷也是今后应该关注的方向。

4) 热泵技术

热泵技术的研究重点是采用混合工质的、能够同时兼顾夏季空调和冬季供暖的双重需求的热力循环过程研究,特别解决热泵系统相应的循环工质特性,特殊热质交换部件结构特征,传热传质过程强化,系统动态和稳态运行特性分析及其流量控制特性。建立基于集热循环的热力学分析模型,并对系统进行性能优化等。

5) 深冷混合工质节流制冷技术

深冷混合工质节流制冷技术是一种跨接普冷(243K)至低温(80K)、介于蒸汽压缩制冷和气体焦汤节流制冷循环的制冷方式,近期已成为这一温区的主导制冷技术。由于采用沸点相差极大的多组分混合工质,内部工作机理相当复杂,必须探讨变工况和变浓度的多元混合工质节流制冷循环的热力运行规律以及混合工质的相变传热和热物性等。要促进我国的能源利用效率、降低煤矿安全事故,应开展天然气和煤层气液化的深冷混合工质节流制冷研究。

6) 固体制冷技术及微型化制冷技术

半导体热电制冷和磁制冷技术在最近也有较大进展,也是值得注意的研究方向。这两种制冷技术都主要取决于材料科学和薄膜制作。利用超晶格甚至量子线(点)制作的多层微型半导体热电制冷技术,可以大大提高制冷效率,有可能首先在大规模集成电子器件的冷却上获得应用。此外,为适应高能流密度的 MEMS 器件、微纳器件的冷却需求,现有各种制冷系统也正朝着采用微、纳技术加工工艺的微型化方向发展,其流动、传热、热力特性等与常规尺度系统有显著不同,需要加强相应的研究部署。

7) 深低温制冷技术

低于 2 ~ 4K 到毫开温度的机械制冷研究,已经不是物理学科的研究问题,工程研究已经有可能获得结果。需要测量量子流体氦-3 (费米子) 和氦-4 (玻色子),以及它们的混合物从室温到毫开温区的热物性;还要研究在极低温区内液体或汽液两相膨胀机有别于一般气体制冷机的制冷特性,以及回热器和冷端换热器中的相变换热特性,填补从 2K 到毫开区的机械制冷机的空缺。

8) 学科交叉及其他

制冷与低温技术具有广泛的应用背景和学科交叉,主要包括:①空气调节与人工环境;②食品冷冻与冷冻干燥;③低温生物及医学;④低温超导及低温电子技术;⑤低温粉碎及材料的低温处理;⑥低温与真空技术;⑦能源利用(天然气/煤层气/氢液化技术, LNG 冷能利用)。在这些制冷与低温技术的应用及学科交叉发展过程中,存在着大量的基础问题需要研究。

2. 3 ~ 5 年优先发展方向

3 ~ 5 年内优先发展方向为:

- (1) 新型节能减排制冷系统的热力学基础与关键技术;
- (2) 利用可再生能源的新型制冷方法的热科学基础;
- (3) 天然气/煤层气低温液化技术的热工学基础;
- (4) 超导电力应用低温制冷方法的热物理基础及关键技术;
- (5) 低温电子器件冷却用高效、可靠微型低温制冷技术的热科学基础;
- (6) 大科学工程用氢、氦液化技术的基础问题。

2.4.5 交叉学科发展方向与目标

1. 重点支持方向

能源环境交叉学科的总体发展战略目标可以概括为:①探索燃料化学能转化

利用过程中能的梯级利用与污染物控制一体化的理论与方法,为建立能源环境交叉学科奠定理论基础;②面向国家重大需求,探索适合我国国情的可持续发展的能源利用技术,建立能源环境相容的新一代能源动力系统的理论基础和设计方案,为未来我国应对气候变化提供理论支持。其前沿课题包括:

1) 污染物源头控制理论基础

- (1) 动力系统与分离过程的相互影响及关联规律;
- (2) 多燃料互补与燃料转换过程中污染物迁移转化的物理化学基础;
- (3) 煤分级转化过程中含碳组分迁移转化现象;
- (4) 反应、分离与化学能释放过程之间的物理化学作用原理;
- (5) 反应分离耦合过程不可逆性与燃料化学能梯级利用的协调原理;
- (6) 燃料化学能梯级利用与 CO_2 定向迁移的协同现象的物理化学基础;
- (7) 非常规燃烧(富氧、富氢、富 CO_2 等)过程的燃烧稳定性、高效性与污染物协同脱除理论。

2) 新型化石燃料洁净利用方法

- (1) 化石燃料与可再生能源互补的燃料转换方法;
- (2) 煤的分级气化与 CO_2 定向迁移耦合的合成气制备方法;
- (3) 反应、分离一体化过程为核心的燃料清洁转换方法;
- (4) 化学能梯级释放与 CO_2 捕集一体化的燃烧方法;
- (5) 脱碳与化工合成耦合的合成气利用方法。

3) 能源环境相容系统

- (1) 多燃料互补的源头捕集 CO_2 的能源动力系统;
- (2) 反应分离耦合过程与热力循环整合的能源动力系统;
- (3) 能量梯级利用、污染物低能耗捕集与资源再循环的生态用能系统;
- (4) 煤分级气化、合成气分步转化、 CO_2 定向迁移的化工动力多联产系统。

2. 3~5 年优先发展方向

3~5 年内优先发展方向如下:

- (1) 化石燃料转换利用中含碳组分的定向迁移与转化理论;
- (2) 燃料化学能梯级利用与 CO_2 定向迁移的协同理论;
- (3) 温室气体 CO_2 控制(捕集、运输与储存等)过程中的能量转化与利用方法;
- (4) 能源-环境系统综合评价准则。

参考文献

- [1] 国家自然科学基金委员会工程与材料学部. 学科发展战略研究报告 (2006 ~ 2010 年) — 工程热物理与能源利用. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定. 北京: 国发〔2010〕32 号, 2010.
- [3] Suryanarayana C. Recent developments in nanostructured materials. *Advanced Engineering Materials*, 2005, (11): 983 — 992.
- [4] Amann A, Cederbaum L, Gans W. *Fractals, Quasicrystals, Chaos, Knots, and Algebraic Quantum Mechanics*. Berlin: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [5] Schmidt J W, Gavioso R M, Moldover M R. Polarizability of Helium and gas metrology. *Physics Review Letter*, 2007, 98: 25404-1 — 25404-4.
- [6] Dohrn R, Peper S, Fonseca J M S. High-pressure fluid phase equilibria-experimental methods and systems investigated (2000 — 2004). *Fluid Phase Equilibria*, 2010, 288(1-2): 1 — 54.
- [7] Egidio Fernandez-Bernal F, Rouco L, Porras E. Modeling of thermal generating units for automatic generation control purposes. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2004, 12(1): 205 — 210.
- [8] Garduno-Ramirez R, Lee K Y. Multiobjective optimal power plant operation through coordinate control with pressure set point scheduling. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2001, 16(2): 115 — 122.
- [9] Lua S, Hogg B W. Dynamic nonlinear modeling of power plant by physical principles and neural networks. *Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2000, 22(1): 67 — 78.
- [10] 周远, 王如竹. 制冷与低温工程. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [11] 陈国邦, 桥本巍洲, 郭方中, 等. 最新低温制冷技术. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [12] Swift G W. *Thermoacoustics: A Unifying Perspectives for Some Engines and Refrigerators*. Sewickley: Acoustical Society of American Publications, 2002.
- [13] Richard J S. *Molecular Simulation of Fluids-Theory, Algorithms and Object-Orientation*. Amsterdam: Elsevier Science, 1999.
- [14] Fonseca J M S, Dohrn R, Peper S. High-pressure fluid-phase equilibria: Experimental methods and systems investigated (2005 — 2008). *Fluid Phase Equilibria*, 2011, 300(1-2): 1 — 69.
- [15] Mills I M, Mohr P J, Quinn T J, et al. Redefinition of the kilogram, Ampere, kelvin and mole: A proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005). *Metrologia*, 2006, 43: 227 — 246.
- [16] Fellmuth B, Gaiser C, Fischer J. Determination of the Boltzmann constant-status and prospects. *Measurement Science & Technology*, 2006, 17: R145 — R159.

- [17] Hudson J B. Surface Science: An Introduction. New York: Wiley, 1998.
- [18] 吴仲华. 能的梯级利用与燃气轮机总能系统. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [19] 金红光, 林汝谋. 能的综合梯级利用与燃气轮机总能系统. 北京: 科学出版社, 2008.
- [20] Obersteiner M, Azar C, Kauppi P, et al. Managing climate risk. Science, 2001, 5543 (294): 786—787.

第3章 热机气动热力学与流体机械

3.1 学科体系、研究范围和任务

热机气动热力学与流体机械是工程热物理与能源利用学科的重要分支,主要研究各种推进系统、民用叶轮机械中的功能转化规律及内流体力学。典型的研究对象主要包括燃气轮机、蒸汽轮机、航空发动机以及工业过程中的各类流体机械。

自20世纪80年代以来,热机气动热力学与流体机械学科的发展经历了重大变化。首先,研究对象除重视传统的推进系统气动热力学、叶轮机械内部流动等宏观问题之外,已拓展到微流动、物理化学流体力学、生物流体力学等某些方面的内容。其次,在研究方法上,大量先进的测量技术已使热机气动热力学与流体机械的实验面貌发生了根本性改变,在揭示复杂流动机理方面发挥了越来越大的作用。再有,计算方法和技术实现了从广泛使用定常流动模拟向三维、非定常、可压缩、黏性、多相流动模拟,甚至考虑随机因素影响的不确定性分析的转变。此外,研究目标从过去只注重揭示内流机理演变到重视采用各种主/被动的流动控制、流固热声多场耦合模型来提高装置综合性能上。总之,随着理论、实验、数值模拟方法的发展及与其他学科的交叉融合,热机气动热力学与流体机械学科已取得了长足发展。但要更好地解决各种流动相关问题的关键仍在于对涉及的应用背景的深刻理解、对所凝练的基本问题的深入认识和不断深入的理论与实验探索。

3.2 战略地位和国内外发展现状

3.2.1 燃气轮机与蒸汽轮机

燃气轮机包括各类重型(发电)燃气轮机、车辆与工业驱动燃气轮机、舰船动力燃气轮机及各种微型燃气轮机。

先进燃气轮机技术是对国民经济持续发展有重大影响的高技术,是国家工业和科技水平的综合标志之一,也是综合国力与国际竞争力的一个重要方面。因此,许多国家都把先进燃气轮机技术作为本国科技的优先发展领域和技术研究的

重点,世界上几个燃气轮机大国都对燃气轮机产品的高端制造与设计技术的出口有严格的限制。

经过近半个世纪的努力,我国燃气轮机在研究、设计与制造方面已经具备了一定的基础与实力,但因燃料政策、综合国力等问题,我国燃气轮机的研制曾在20世纪七八十年代后有所停滞。尽管我国已通过一定方式引进了燃气轮机制造技术,但燃气轮机中的高端技术如高温热端部件以及控制系统仍在外资控股的厂家内制造。在“十五”、“十一五”期间,国家相关部门先后实施863计划、973计划专项对先进(重型、微型)燃气轮机技术进行集中攻关,建成了关键部件(永磁发电机、压气机、涡轮、燃气与燃油燃烧室、回热器)试验平台和整机试验平台,初步形成了部件及整机设计、加工、装配调试、部件及整机试验等研发体系,基本具备了燃气轮机设计、制造和试验能力,为燃气轮机产业化项目的开展进行了积极和富有成果的探索。但我们应该清醒地认识到,我国并没有在真正意义上全面掌握现代燃气轮机设计技术,基础研究急需补课的内容太多。事实上,这一现代高技术集成的动力装置已经成为我国发展众多高端核心技术的障碍和“瓶颈”,因此,如何将我国工程热物理与能源利用学科的发展与我国燃气轮机技术的发展联系起来是必须考虑的问题。当前急需在先进叶轮机械设计体系,边界层控制,湍流、旋涡、汽泡、不稳定分离流动,主、被动流动控制途径及热端部件冷却技术,非定常流动与流固耦合,气动声学,先进实验研究技术,高可信度数值计算方法等方面潜心开展研究工作。这些关键科学技术问题的研究,将会极大地推动我国先进燃气轮机技术的发展。

蒸汽轮机在相当长的一段时间内还将是我国地面大型火力发电机组的核心装置,进入21世纪后,由于国内对节能减排、稳定增效、全工况优化运行的急迫需求,国家近两年在973计划和863计划中均有重点部署,其目的是解决超超临界火电机组发电和智能电网面临的技术难题。但从基础层面上讲,还有许多基础研究内容未见部署,如非对称流动导致的轴系强烈振动的问题、长叶片颤振、局部堵塞引起的效率降低、非设计工况下自适应优化运行策略、与重型燃气轮机匹配、高/中/低压缸匹配等基础问题还有待于科学家们进行长期不懈的探索,才能全面提升我国蒸汽轮机的设计和运行水平。

3.2.2 航空发动机

众所周知,20世纪40年代初,英国和德国先后发明了燃气涡轮发动机,使得航空工业发生了一场革命。

在第二次世界大战以后的半个世纪中,航空发动机技术的巨大进步对航空工业的迅猛发展起到了关键的推动作用。同时,现代飞机尤其是军用飞机不断提高

的技术指标对航空发动机提出了非常苛刻的要求,高温、高压、高转速而又要高可靠性、长寿命、轻重量是其基本特点。在这些苛刻而又有些矛盾的高要求的推动下,作为发动机技术支柱的热机气动热力学、材料学、结构力学和结构设计技术、工艺技术及自动控制技术已发展到很高的水平,航空发动机就是建立在这些学科基础之上的综合高技术产品。从系统的观点看,发动机以部件技术为基础,通过精确的、能全面协调的总体集成匹配技术才得以设计研制成功。由压气机、燃烧室、涡轮构成的核心机研制技术已成为新的发展趋势,同时,风扇/压气机、燃烧室、涡轮作为航空发动机的重要部件,技术含量高,难度大,时常成为阻碍高性能推进系统研制成功与否的关键部件。

目前,美国开展的综合高性能涡轮发动机技术计划(IHPTET)及多用途经济可承受性先进涡轮发动机(VAATE)计划已取得重大进展,推进系统推重比达到15~20,耗油率降低40%。为了同美国竞争,以英国为主,意大利和德国共同参与实施了先进核心军用发动机计划的第二阶段(ACME-II),英国、法国又联合实施了先进军用发动机技术计划(AMET)。北大西洋公约组织和俄罗斯也都有类似的大型研究计划。其中俄罗斯已经有计划地开展了高推重比的航空发动机技术的先期研究工作,其最终目标是在2010年左右使航空发动机的推重比达到20的水平。

我国大飞机项目的实施以及未来军用高推重比发动机的开发,对所涉及的航空发动机气动热力学提出了更高的要求,出现了一些新的技术问题需要加以研究、解决。高推重比对风扇/压气机的要求是更高的单级压比,对流动稳定性、结构完整性和可靠性提出了严峻挑战,亟须开展如下热机气动热力学基础问题的研究:①非定常三维可压缩流动的数值模拟,为提高非定常气动力、失速与喘振、气固弹性的预测精度提供理论依据;②转子叶片造型的新方法与试验技术,为提高失速裕度与抗畸变能力提供技术支撑。

3.2.3 流体机械

工业过程中的流体机械主要包括压缩机、鼓风机、通风机、泵以及各类水力机械、风力机械,它们以空气、水、各种化工气体或液体作为主要工质。流体机械广泛应用于国防军事、航空航天、冶金电力、石油化工、能源动力等重要行业中,其工业产值约占我国通用机械行业工业产值的二分之一,它们在创造巨大经济效益的同时,又消耗着全国工业用电量的30%~40%,由此可见流体机械在国民经济中具有特殊的重要地位。

经过60余年的发展,我国流体机械行业已初步形成了集教学、科研、设计、制造、成套服务等门类齐全、规模庞大的体系。特别是20世纪70年代末期至80年代中期,我国较大规模地引进了意大利新比隆、日本日立、瑞士苏尔寿等世界

著名流体机械装备公司的设计、制造技术,对提高我国流体机械行业的技术水平起到了重大作用。但是,20世纪80年代后期,国外公司将大型流体机械的关键技术作为战略高技术加以控制,不再向中国转让。根据《国家节能中长期专项规划》、《“十一五”十大重点节能工程实施意见》等,国内流体机械80%以上的产品设计效率比国际先进水平低2%~4%,而实际运行效率比最高效率点低20%~30%的情况更是不胜枚举,流体机械节能潜力巨大。提高机组与系统效率,任务十分艰巨。另外,由于机组处于非设计工况下运行,如压缩机的喘振与防喘振策略,泵与水轮机的空化机理及抗空化技术、泥沙气蚀联合磨损机理与防护,流体非定常激振等问题一直是该领域中保证机组安全、可靠运行的重要研究课题。

毋庸讳言,我国流体机械学科研究现状不能完全满足国家对重大过程装备“节能减排”及国产化的重大需求,需要进一步开展并加强一些重要的基础理论及关键技术研究,主要包括:①多级流体机械非定常流动理论及控制;②流体机械的多学科优化设计方法与流固耦合;③流体机械噪声预测理论与控制;④极端条件下的流体机械关键部件的设计与精密制造;⑤流体机械高可靠性、环境友好运行理论。

3.3 目前和今后10年本领域科学研究牵引动力的分析

我国目前正处在全面发展阶段,国际上本领域的一些跨国公司均瞄准我国的市场,先后在我国独资或者合资成立了研发基地。例如,美国GE公司在上海成立了能源技术研发中心,英国BP公司与我国一些科研院所成立共同研发体,德国曼透平(MAN)公司在我国成立众多形式的共同体,丹麦风力机械试图垄断我国风力发电市场,美国GE、日本三菱、德国西门子分别与哈尔滨哈飞汽车工业集团有限公司、上海汽车工业(集团)总公司、东方汽轮机有限公司组建了外方控股的合资公司,并开始形成产业链,而这些产业链的高端核心技术并不向中国转让。在一些涉及国家能源安全领域,如西气东送线、中俄长距离天然气管线中的化工离心压缩机的国际招标市场上几乎没有中国流体机械企业的发言权。可见,我国与本学科密切相关的自有知识产权的形成急需本研究领域的基础性科学研究问题的诠释,在一定意义上,这就是国家利益的需要。

自20世纪50年代至今,吴仲华先生的三元流理论一直引领着本研究领域的发展,客观地说,目前我们在国际上已经失去了话语权。在未来一段时期,我们通过什么方式的努力和奋斗才能进入该研究领域中的部分引领地位很值得思考。在总结现有文献资料的基础上,我们发现:①高可信度计算流体力学;②现代流动测试技术;③非定常流动及气动弹性;④气动声学;⑤非定常体系下的叶轮机械现代设计方法;⑥主/被动流动控制技术;⑦极端条件下叶轮机械技术;⑧其他学科新概念

向本学科的移植和嫁接等,是目前本研究领域需要加强研究并探索的主流方向。出发点是基础研究实力,是国家综合国力象征,在未来 10 年的基础性研究内容的建议方面将充分考虑这种需求。这正是自然科学基金必须面向基础的需要。

随着国家发展先进推进系统计划、重大装备节能减排发展战略的实施,以及低碳经济发展模式的提出,作为国民经济中的重大技术装备及能源动力系统中的核心部件,大型叶轮机械在节能减排、重大技术装备国产化中占据着举足轻重的地位。目前,制约大型叶轮机械行业技术进步的三大“瓶颈”是节能设计理论、扩稳技术以及气弹耦合;其核心问题是三维非定常可压缩黏性流动,以及其与大型高速回转机械结构动力学耦合的理论模型、计算方法和实验技术,这也是近年来热机气动热力学与流体机械领域的国际前沿性课题。

科学研究的历程是艰辛漫长的,杰出领军人才的成长需要长期的积淀。美国总统奥巴马在 2009 年 4 月 27 日美国科学院年会上的能源科研部署的演讲中,特别指出要将新一代能源创新人才培养放在重要位置。因此,在本领域未来的基础科学研究计划中需要对年轻的科学家给予倾斜式支持,尤其是对那些有从事高风险/高回报、挑战传统理论体系、创新内涵显著的年轻人要有持续性支持。从这个意义上看,国家自然科学基金面向人才是本领域持续发展的客观需要。

3.4 重点基础研究内容建议

根据国家自然科学基金更加侧重基础、更加侧重前沿、更加侧重人才的精神,以及优先支持新、深、实、严的研究方向,在制定本研究领域在未来 10 年的学科规划中遵循如下基本原则:①基础性与前瞻性兼顾的研究;②交叉性与共融性兼顾的研究;③在国际学术舞台上引领作用雏形问题研究;④挑战传统理论和概念的研究。

3.4.1 叶轮机械中的计算流体力学

在近 20 年的时间里,计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 基础算法及应用范围得到了很大发展。近年来,美国、日本、欧盟等开展了基于百万亿次、千万亿次并行计算的重大研究计划,都把高可信度计算流体力学 (high-fidelity CFD) 列为重要的支持方向。在叶轮机械领域,目前已由美国国防部及其合作者采用 RANS 模型计算了某一军用涡扇发动机的前 3 级压气机整圈叶片通道内的非定常流动,德国西门子与 ANSYS 公司正在合作开展 10 级轴流压缩机整机非定常流动并行计算。2010 年我国成功研制出“天河一号 A”超级计算机,其实测运算速度高达每秒 2.57 千万亿次,雄居世界第一,为开展叶轮机械计算流

体力学的高水平应用提供了坚实的硬件条件。

针对计算流体力学在叶轮机械内部复杂流动数值模拟中的应用前景,以及国内尚无自主知识产权计算流体力学软件现状,建议重点开展如下研究方向:

(1) 在算法格式方面,发展格式精度高、收敛速度快、稳定范围宽的新型差分格式,研究结构/非结构混合网格方法、浸入边界法、运动边界法、无网格法、自适应网格法,鼓励开展低耗散、低频散、高精度基础算法研究(如拟谱方法、高阶紧凑有限元及有限差分法),拓宽格子-玻尔兹曼法、粒子法等新型计算方法的应用领域;重点研究叶轮机械动静叶片排交接面上的变量传递模型及高精度插值格式,为开展流固耦合、气动声学耦合等问题提供高可信度流场数据。

(2) 在基础并行算法方面,深入挖掘叶轮机械非定常流动计算的几何、物理、数学、数值模型的内在并行机制,结合高效能计算机的混合多层次架构的发展趋势,研究通用处理器 CPU 核、加速处理器 GPU 核、网络拓扑和通信模式对并行计算流体力学性能的影响;研究计算流体力学基础并行算法在高效能计算机系统、节点、处理器、核、线程的分级架构体系上的映射方案(见图 3.1)。

(3) 在流动机理方面,数值研究叶轮机械内部全三维、非定常、可压缩、湍流流动,以及转/静干涉、流动失稳、空化、多相、多尺度流动等。

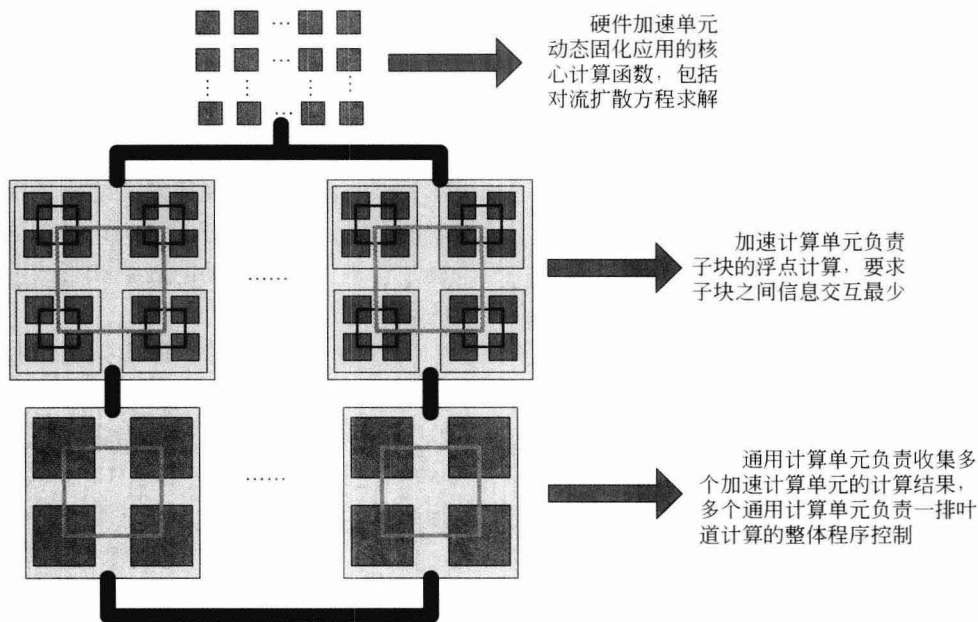


图 3.1 计算机混合架构与叶轮机械非定常流动并行计算的映射方案

3.4.2 叶轮机械中先进的实验技术

叶轮机械设计技术由于与内部流动的非定常本质属性密切相关,尤其与可压缩流动内部多类边界层(径向、周向、轴向)分离、多级匹配、激波干涉、间隙流、动/静干涉、尾迹耦合及流动失稳等因素有关,导致在实验研究能力方面必须有一个大的提升,才可能找到拓宽稳定性的途径,形成非定常意义下的设计技术。

叶轮机械内部流动测量技术面临高温、高压、高频响、同步、锁相、多通道、海量数据储存、相对坐标系与绝对坐标系转换、气动声学/弹性力学因素兼顾的挑战,因此急需提高我国在叶轮机械领域的实验技术与测试水平。

在动态测试技术方面,由于高速旋转叶片的单通道通过的频率特别高,如转速 24000r/min,动叶片个数为 17 时,单通道通过的频率为 6.8kHz,如果每个通道需要 10 个采样点来描述流场的性质,就需要动态压力传感器的频响超过 68kHz。考虑到动态传感器的动态滞后效应、高速采集系统通道匹配及光电锁相的要求,这一测试技术具有很强的挑战性,需要解决测试探针的微尺度性、三维感受性、测试数据的非定常性、动态滞后的空腔性、气体可压缩因素的修正性、高速锁相同步性和海量同步数据的快速储存性相结合的科学问题。

现代非接触测量技术的快速发展为叶轮机械内部流动测量提供了很好的机遇。该项技术在其他学科发展的趋势很强劲,使得从事叶轮机械内部流动机理与控制技术的科研人员有了很大的压力,但应该清醒地认识到这些非接触测量技术在我们专属性科学问题的实验探索方面是遇到挑战的:①激光测试技术面临示踪粒子跟踪的准确性与同步性、内部流动涡旋过程与粒子运动定量的误差评判依据及在线标定等问题;②目前还没有办法解决示温漆与温度分布规律渐变之间的关系;③高速射影技术与高频响衔接和定量呈现的问题还没有很好的解决,类似这些测试技术中科学问题的澄清,对于我们诠释叶轮机械内部流动的规律和形成我国自有知识产权叶轮机械设计技术是有很大的促进作用的。

自 20 世纪 90 年代开始,以美国 NI 公司为代表的测试技术,即虚拟测试技术与计算机技术的交叉和融合,为叶轮机械高速测量和海量数据快速储存提供了机遇。所谓虚拟仪器就是将计算机中的 R232、IE488 及计算机高速数据采集板结合起来,很好地解决了模拟信号与数值信号的高速转换,由于计算机 CPU 和并行技术的发展,先进的叶轮机械内部流场的测试技术充满了前景。尤其是软件快速分析工具库的发展及各软件动态连接技术(DLL)的发展,使得实验数据分析的效率、准确性、海量囊括性得到很好的统一。但我们也应该清醒地看到,这一测试技术离我们在叶轮机械领域的实际应用还有很长的路要走,主要体现在:①多类型现代数据处理方法的兼顾-分段线化、分段样条、自相关、互相关、小

波、功率谱、概念/统计等分析技术与我们测试数据在线或离线分析的专家库没有形成；②测试技术与测试控制技术的鼠标化操作还未见雏形；③在线标定与测试同步/同时的问题没有很好的解决。

上述测试科学问题的解决将推动我国叶轮机械非定常测试技术的发展和提升，但国内尚无在世界上有重要影响的试验方法。随着经费投入的快速增长，虽然我国学术论文数量和水平已经有较大的提高，但还没有产生重要影响的系列成果。

3.4.3 叶轮机械的非定常流动及流固耦合机理

1. 叶轮机械的非定常流动机理

叶轮机械内部非定常流动主要表现在湍流脉动、尾迹涡脱落、尾迹-叶片相互干扰、颤振、时序效应、旋转失速、喘振及瞬态工况等宽广变化范围内的非定常流动结构（见图3.2），其中，从最小的湍流脉动结构到最大的瞬态工况流动结构（发生在启动、停机、调节、进口畸变等动态过程）的时空尺度跨越5~6个数量级。这些复杂的三维非定常流动结构以不同的时空尺度、遵循着不同的非线性发展规律下相互耦合和激励，构成了大型叶轮机械特有的流动现象和丰富的科学内涵。尤其在旋转失速、喘振等非稳定运行条件下的低频、大尺寸的非定常流动是引起大型透平压缩机气动性能急剧下降、叶片剧烈振动，甚至叶片断裂、造成机毁人亡的根本原因。从非定常中要效率，从非稳定中要安全，深入探讨这些非稳定、非定常流动的产生、发展、演变过程是保障大型叶轮机械高效节能、安全可靠运行的根本出路，需要研究的基础问题有：

（1）叶轮机械内部三维非定常流动机理，主要包括动静部件间的固有非定常流动、非定常分离流动、多重尺度非定常流动现象的耦合影响等。

（2）多级叶轮机械内部非定常流动，主要包括级间非定常流动相互影响，多级流动损失机理，叶片排间时序效应，多叶片排部分环叶道乃至整机非定常流动现象，通流部件与叶顶间隙、腔体、密封等细微流动部件之间的非定常干涉现象，基于非定常流动理论的叶轮机械多级气动布局、造型与优化，以及非定常流动的海量数据处理方法与特征提取等。

（3）喘振及其控制方法。研究轻度喘振、经典喘振、混合喘振和深度喘振特征及其演变过程，从非定常流动机理、非线性动力学角度出发，探究流动不稳定成因、演变及发展过程，提出安全可靠、经济可行的透平压缩机扩稳设计方法及流动控制方法，将是该方向上的发展趋势。

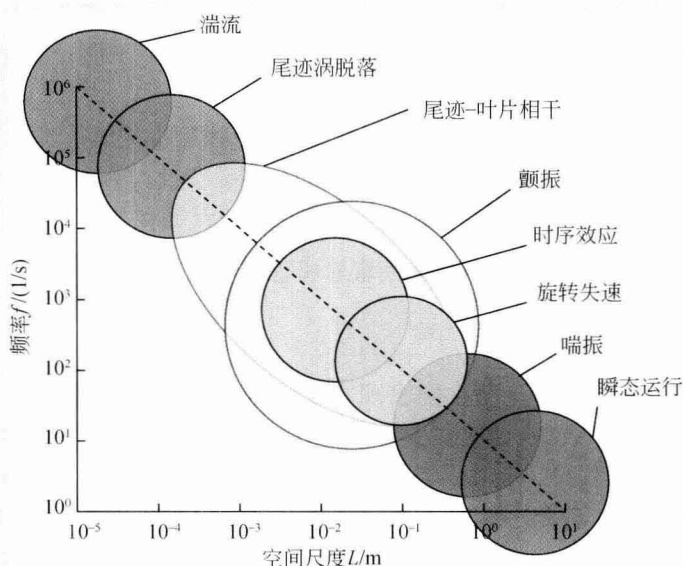


图 3.2 大型透平压缩机非定常流动时空谱分布

2. 压气机失速先兆形成机制

压气机失速先兆的确定是扩大压气机稳定工作范围的前提和基础，是连接不同流动形态的纽带，对失速先兆形成过程的充分认识有助于对其他流动形态的认识。在过去的时间内，对轴流压气机失速先兆形成机制的研究取得了一定进展，但必须清醒地认识到，目前在此方面的主要理论及实验研究成果主要由世界上很少的几家研究机构及公司获得，到目前为止还没有搞清失速先兆的形成机制，没有获得准确的物理描述，对离心压气机内部失速先兆形成机制的研究基本处于空白状态。未来主要研究方向有：

- (1) 压气机失速先兆的形成机制及准确的物理描述；
- (2) 压气机失速过程中出现的一些特殊的流动现象；
- (3) 建立失速先兆的预估机制，改变被动发现的现状；
- (4) 探索在设计阶段判定所发生的失速模态的类型及发生位置的方法；
- (5) 多级压气机失速的形成机制问题；
- (6) 压气机失速主动控制方法。

3. 叶轮机械的气弹耦合机理

气弹耦合是叶轮机械的根本属性，也是高效、低噪声、高稳定性、长寿命叶

轮机械设计的前提。这方面的主要研究内容有：

(1) 旋转机械内部流场与轮缘/隔板材料应力、应变场以及共轭传热的机理及建立相应的数值分析方法；解决机械-气动-热力-声学耦合边界条件的施加、载荷、变形在多场之间的有效传递问题；与传统解耦的算法进行对比，获得更为准确的静、动应力，压力、温度等气动参数信息。

(2) 提出以气动效率高、噪声低、出口参数分布均匀、总体重量轻等多目标优化方法。以获得的结构应力、气动参数、热应力分布对叶轮机械进行优化改型，解决的重点为优化目标函数之间的协调、多场载荷的传递。

(3) 建立多学科耦合与优化方法的分析体系，进一步确定气（流）固热声四者耦合分析方法，获得多场参数的分布及变化规律。

(4) 透平压缩机失谐叶片盘气弹模型与结构完整性分析方法。从结构动力学来看，透平压缩机转子多采用盘式组装结构，其叶片、叶片盘、轴系的结构变形、应力波都无法再按照传统连续弹性体的方法来处理。此外，由于材料制备的不均匀性，刀具轨迹、打磨、抛光、焊接、热应力释放等加工及安装的误差，以及叶片磨损、轴系振动等因素，实际转子的叶片盘都是失谐叶片盘，叶片之间存在随机偏谐小量，在高速旋转情况下，失谐叶片盘动力响应出现明显的模态局部化（见图3.3），受迫振动振幅远大于谐调叶片盘，导致结构动应力增大、高周疲劳，降低机器寿命。透平压缩机的气弹失稳分析的近期研究重点是：基于多级非定常流动环境下的失谐叶片盘气弹动力过程的理论模型、计算方法及实验技术；基于频域法、时域法、频-时域混合法的快速非定常气动力计算方法；失谐叶片盘的子结构有限元法；旋转失速与模态局部化的关联性研究，以期在气弹失稳分析框架下提出改进叶片盘减震的新理论、新技术。

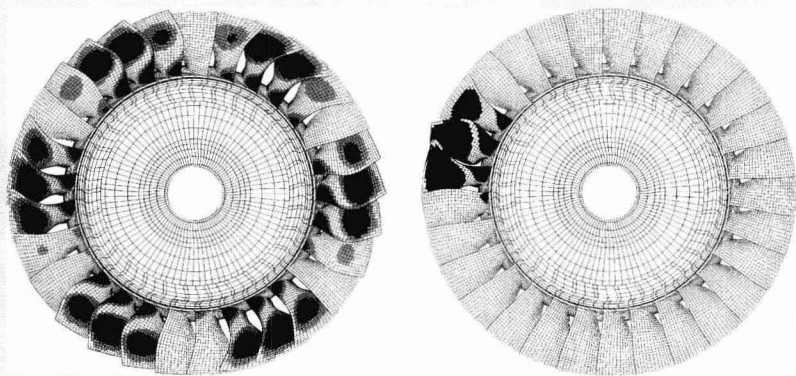


图 3.3 谐调及失谐叶片盘的模态局部化

(5) 燃气透平冷却及其流热固耦合问题研究。主要研究以空气为冷却介质的叶片气膜冷却与叶片内部冷却机理, 以蒸汽和含雾空气为冷却介质的叶片闭式冷却机理, 空气/蒸汽冷却透平中高温燃气-叶片本体-叶片内部冷却系统的流热固耦合机理及多目标优化问题, 叶片热应力均匀化问题, 以及提高冷却叶片设计与使用寿命问题。

3.4.4 叶轮机械气动声学基础问题

现代及未来民用飞机均必须满足日益苛刻的噪声和污染排放适航标准。在2020年左右, 国际上很有可能实施比第四阶段低10dB的第五阶段适航条例, 因此, 针对大型民用飞机的主要噪声源开展气动声学方面的基础和应用基础研究是我国自行研制大型民机能否与波音和空客相抗衡的迫切需求。此外, 气动噪声也已成为现代燃气轮机、风机和风力机等其他各种叶轮机械最重要的设计指标之一。叶轮机械气动声学基础科学问题的研究, 不仅有助于提升工程应用能力, 而且能推动气动声学的学科进展。关键基础科学问题有:

- (1) 适用于复杂几何条件、复杂湍流流动噪声产生机理和传播特性的各种高精度数值计算方法;
- (2) 高效低噪叶轮机械气动与声学一体化设计规律, 考虑噪声效应的气动反问题;
- (3) 动静叶片干涉噪声的产生与抑制机理;
- (4) 高速喷流噪声的产生与抑制机理;
- (5) 先进的局域与非局域声衬吸声机理与声传播特性;
- (6) 流体机械内部非定常流动诱导振动与噪声产生的机理及规律, 获得低噪声低振动设计方法;
- (7) 基于仿生学原理的气动声学降噪机理与噪声控制。

3.4.5 非定常流动体系下的叶轮机械设计理论

叶轮机械是高性能航空、航天、航海推进系统及新一代民用叶轮机械中的关键部件, 其设计水平衡量了一个国家能源利用及装备的科技发展水平。目前的研究热点主要集中在如下方面:

(1) 先进气动设计理论方法和技术。计算流体动力学与现代控制理论相结合的全局优化设计方法、级环境下的非定常流动模型与气动布局相结合的反设计方法、级环境下伴随系统的建立是目前的研究热点, 基于流固热声等现象的多学科设计优化方法将是该方向上的学术发展趋势。

(2) 基于非定常流动控制的现代设计理论, 目前尚无公认的理论框架。

(3) 气动弹性作用机理与安全性设计方法。近年来,由英法德意等 15 个欧盟成员国的航空工业界及科研院校参加的欧盟 UNSI 计划对流体结构相互作用,尤其是机翼颤振的非定常黏性模型与计算方法展开了系统研究,涉及结构力学、流体力学、计算方法等领域。在叶轮机械领域,非稳定运行工况下的叶片失稳机制、基于非定常流动模型的主/被动减振设计技术是该方向上的重要发展趋势。

(4) 基于叶轮机械非定常反问题理论的多工况点设计研究。多工况点设计方法因其具有极大的工程应用价值而备受关注,但由于每个工况点的流动条件不同,建立一个统一、有效的多工况设计方法极其困难,现有的种种多工况设计方法基本都是将几个单工况设计凑合而成。基于“人工振荡机翼”概念给出的机翼非定常反问题及相应的变域变分理论,以及利用假设的“人工来流振荡”将多工况点串联起来,形成满足多工况设计要求的气动变分原理,为叶轮机械多工况点设计研究提供了理论基础。在此基础上开展相关研究,对取得叶轮机械多工况点设计方法的突破性进展具有十分重要的意义。

(5) 基于随机控制理论的叶轮机械鲁棒性优化设计方法。将鲁棒优化设计思想注入多学科优化设计中,研究如何集成现有的统计分析方法、试验设计模型及优化算法等建立高效、可靠的多学科鲁棒优化设计理论框架。重点发展叶轮机械气动失谐、结构失谐的随机分析模型及鲁棒性设计优化方法,提高叶轮机械实际运行性能对各种不确定因素的抗干扰能力(见图 3.4)。

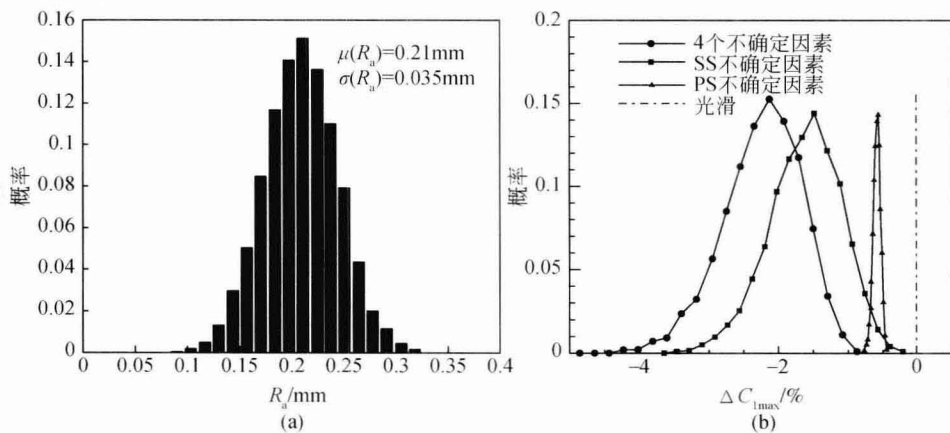


图 3.4 叶型粗糙度概率模型与不确定性分析

3.4.6 叶轮机械中的流动控制技术

流体流动控制不是一个新的概念,但在将其用于提高燃气轮机及航空发动机

部件气动热力性能方面却极具潜力。在流动控制方法中,通过改变叶栅流道的几何形状如弯、扭、掠叶片、端弯叶片、翼刀、串列叶栅、可控扩散叶型、端壁成型和旋涡发生器等达到控制叶栅流动的控制方法称为被动控制方法。在叶栅中通过局部吹气、吸气或其他强化附面层流动(如等离子体流动控制)从而影响附面层流动、防止分离的控制方法称为主动控制方法。其中,主动流动控制是当前流体力学的一个重要研究领域,它可以通过在局部区域输入少量能量,来获得非局部或全局的流场结构的优化。主动控制是动态的和实时的,即动态控制,它能实时感知并预测流动状态的变化,其控制动作随流动状况改变而改变,因此可以获得较为理想的控制效果。建立以流动控制技术和稳定性控制技术相结合的叶轮机械一体化设计技术,研究主要包括:

1) 有关等离子体控制技术方面的研究

近年来发展起来的等离子体主动流动控制技术具有输入能量少、结构小、控制灵活等优点,等离子诱导流动机制、诱导速度产生机理及其对附面层内流动的影响等方面研究已成为该领域较为前沿的课题,受到众多研究者的重视。2005年,美国空军科研局已将等离子体动力学列为未来几十年内保持技术领先地位的六大基础研究之一。但是目前对等离子体流动控制的化学物理过程的研究尚不充分,对其作用机理也不完全清楚,因此研究等离子体激励器介质击穿过程及其控制附面层流动分离机制具有重要的意义。

未来 DBD 等离子体控制技术应开展以下几方面的研究:①根据等离子体粒子的产生、运动、能量传递过程,建立其连续性方程、动量方程和能量方程,构建可较真实反映等离子体激励器介质击穿过程的数学模型;②在流体运动控制方程(N-S方程)中较全面地考虑等离子体与气体间的动量传递、能量传递过程及等离子体对流体物性的影响,建立既能描述等离子体各组分粒子产生、运动、发展过程,又可模拟带电粒子与流体运动耦合作用的数值仿真方法;③应开展等离子体对附面层流动分离影响的数值模拟及实验研究,通过分析等离子体对附面层流动的速度、压力、温度等参数的影响,考察二者之间的动量、能量传递耦合过程,并探讨等离子体控制附面层流动分离的机制,为利用等离子体控制高负荷压气机叶栅内的流动分离奠定理论基础。

2) 利用涡轮叶片前缘端壁倒角(fillet)控制壁面热负荷的机理研究

目前,国内这方面的研究还未见开展。在国际范围内,相关研究也不多,关于利用叶片前缘倒角控制涡轮端壁区域热负荷的机理,目前还缺乏统一和明确的认识。此外,现有的研究还存在以下不足:气流速度过低(来流马赫数小于0.1),自由流湍流度过低(小于1.0%),和实际燃气轮机涡轮进口燃气条件不相符,从而影响了现有研究成果对该技术在实际燃气轮机中应用的指导价值。燃

机涡轮叶片的气动性能和热负荷与气流参数密切相关,如自由流湍强度、马赫数、燃气温度和雷诺数等,其中自由流湍流度对叶片的壁面传热影响尤其大。在燃气轮机中测量湍流度是极其困难的,研究人员发现燃烧系统产生的气流湍流度水平通常在 $7\% \sim 30\%$ 。

目前有限的研究或着重在气动性能的提高,或着重在热负荷的降低,没有将二者统一在叶片前缘端壁倒角的研究中。在相对真实的、符合实际燃机涡轮气流参数条件下,研究叶片前缘倒角对涡轮叶片的气动损失和端壁热负荷的影响,还未见发表,而这方面的研究成果更具有实际的理论意义和应用价值。

3) 附面层吸入式进气道流场畸变控制研究

为了降低商用飞机对环境的影响,英国剑桥大学和美国麻省理工学院的专家们提出了翼身融合飞机(blended wing body, BWB)的概念,它不但可以把飞机噪声降到最低,而且油耗也比传统飞机大大减少。翼身融合飞机性能比传统飞机优越,部分原因是翼身融合飞机采用附面层吸入式弯曲进气道,可以吸入较多数量的附面层流体,但是随之而来的一个关键技术挑战是,如何消除由于附面层流体的吸入而引起的压气机进口严重的流场畸变,这是制约这种新概念静音飞机能否成功的因素之一。

此外,发动机进气道作为推进系统的主要部件,显著地影响推进系统的长度。以飞机为例,飞机的长度、质量和成本直接与进气道的长度有关。通过对尺寸相似飞机的分析表明,当飞机缩短1个进气道直径长度时,飞机空重减少15%。为此,美国近年来开展了先进紧缩型进气道系统研究计划(Advanced Compact Inlet System),以降低先进战斗机进气道质量和体积。研究结果表明,采用紧凑管道和无隔道进气道可以获得显著的收益和节约寿命周期费用,最终目标是使发动机进气道轴向尺寸缩短60%。此外,现代战争对飞行器的隐身能力也提出了要求。有关研究表明,飞行器的外形结构对电磁隐身性能的影响非常大,其中推进系统特别是进气道部分是一个强散射源,采用埋入式进气道是一种减少暴露面积的良好解决方法。与常规采用附面层隔道的进气道比,埋入式进气道除了能有效地减小电磁散射面积(radar cross section, RCS)外,还能最大限度地减小进气道的迎风面积,降低迎风阻力,因此具有更多的优良性能。但是埋入式进气道的投入使用,同时伴随着进气道长度的不断缩短,必然导致进气道的总压损失和流场不均匀度过大的问题。

由此可见,无论是翼身融合飞机进气道还是埋入式进气道,由于吸入了机身上较厚的附面层流体,常规设计技术已无法满足进气道的气动性能要求,采用主动流动控制技术为实现这一目标开辟了一条道路。

主动气流控制是一种新兴的技术,它将使先进的飞行器设计超出传统的空气

动力限制,是一个较大的进步。在发动机进排气系统方面,对于奇异流动路径的管道设计方案,流动控制技术给设计带来了潜在的不可预知的自由度。它将使不考虑飞行条件来优化发动机内流流场成为可能,也能够提供较好的喷管系统功能,同时允许减少重量和经费。

目前,美国正在进行的研究工作集中在高隐身、超紧凑进气道构形方案在逼真状态下的控制效果上。现在正在研究智能微型涡流发生器和微机电控制系统来控制涡流发生器的状态。将来的研究工作集中在如何使主动气流控制适应更宽广的飞行状态,包括机动飞行、各种速度状态和流量范围,以适应可预见的未来进气道系统的需要。此外,融入分布式反馈传感器和闭环控制逻辑的控制方案也在研究之中。这项研究的目的是安装一个流动控制系统,使进气道系统设计可以不受限制,而同时在整个飞机操纵范围可以优化发动机进口流场。

对于定常吹气和射流式旋涡发生器两种主动流动控制方案对进气道性能影响的研究结果表明:对于定常吹气控制方案而言,顺主流吹气改善流场畸变的效果比逆主流吹气要好,且存在对应最佳吹气量,并非吹气量越大控制效果越好。射流式旋涡发生器布置在进气道第一个弯道附近控制效果好,随着吹气量增大,流场畸变程度下降,最大可达 35.8%。由此可见,主动流动控制方法是改善附面层吸入式进气道流场性能的有效手段,但是寻找最佳控制方案需要针对具体应用对象进行优化设计。因此,附面层吸入式进气道流场主动流动控制方法进一步研究的方向在于,探求控制方式(吹气、吸气或二者组合)和控制量(吹/吸气位置、吹/吸气量)与控制目标(畸变值、总压恢复系数、旋流)之间随工况(飞行高度、飞行马赫数、俯仰角)变化的对应关系,力求建立附面层吸入式进气道主动流动控制技术的设计准则。

在传统的流动控制器件设计过程中,人们总认为被控制对象是不变的。但为了完成特定的任务,需要用控制的手段去改变系统的构型,例如采用可变翼型满足对空气动力学的要求,解决这类问题常常涉及流体力学、固体力学、智能结构(材料)和控制理论的一体化,实现对传统流动控制理论的突破。

3.4.7 非常规叶轮机机械及其流动机理

1. 超声速燃气轮机关键问题

超声速燃气轮机是在 Ramgen 燃气轮机、Ramgen 发动机和先进超声速部件发动机(advanced supersonic component engine, ASCE)的基础上提出的一种新型燃气轮机结构。超声速燃气轮机在设计过程中融合了超声速进气道中应用的激波压缩技术、环形旋涡燃烧技术、超声速膨胀喷管技术和常规轴流燃气轮机的设计技

术,其压缩系统采用旋转冲压压缩转子,燃烧室采用环形旋涡燃烧室,而其膨胀系统采用的是超声速喷管。与常规燃气轮机相比,超声速燃气轮机具有体积小、结构简单紧凑、退重比大、效率高、污染物排放低等优点,并且能够燃用多种燃料,可广泛应用于航空、坦克、舰船和分布式供能以及从大型工厂到居民家庭的各类动力和能源装置。关键问题主要有:①旋转冲压压缩系统设计及其内部流动控制与优化;②环形旋涡燃烧室流场与燃烧特性研究;③旋转冲压压缩转子机械-气动-热力耦合与多学科设计优化。

2. 高负荷压气机概念与流动机理

到目前为止,压气机的负荷水平已经实现了相当高的指标,在传统设计参数范围内,以三维叶片造型(弯、扭、掠)为主要技术手段的设计方法,对负荷进一步提高的贡献有限。因此,有必要对高负荷压气机设计技术和附面层流动控制机理进行深入研究,突破传统设计参数选择范围,形成以基于分离流动主动控制技术为核心的高负荷、高效率和高端裕度为特点的新型压气机设计思想及相应的基础理论。

在高负荷概念探索方面,建议开展结构简单、工程可实现性好、高可靠性的设计概念以及相应的匹配原则研究;在分离流动控制方面,附面层抽吸是一种有效的流动控制手段;在燃机循环层面上,具有符合能量梯级利用、不需要消耗外界附加能量的优点,因此,在具有气膜冷却的燃机中,该流动控制技术具有独有的优势。由于随着负荷指标的提高,扩压叶栅内的分离与旋涡组成及其对损失影响的权重会有极大的不同,故立足于附面层抽吸控制分离流动,建议开展以下方面的研究:高负荷扩压叶栅内旋涡结构及相应的分离模式的研究;分离流动的非定常运动与演化规律的研究;在设计点与变工况条件下,主动(附面层抽吸)控制三维分离的机理研究;高负荷扩压叶栅内的径向流动及径向掺混损失的机理研究;叶尖小翼对高负荷压气机动静叶栅流场及性能影响的研究,主要包括:①叶尖小翼参数及其布局方式对叶栅流场结构及性能的影响;②不同叶顶间隙时叶尖小翼对高负荷叶栅流场及性能的影响;③不同进口条件下叶尖小翼对高负荷叶栅流场及性能的影响;④叶尖小翼控制高负荷压气机二次流,特别是叶尖流场泄露损失的机理;⑤叶尖小翼影响高负荷压气机级工作特性及稳定工作范围的机理。

为适应航空发动机更高的推重比及更低的耗油率指标,未来的风扇/压气机必将沿着以小展弦比、三维造型为主要几何特征的方向继续发展,以达到期望的高负荷、高效率、高裕度要求。而风扇/压气机小展弦比三维设计的主要气动特征是流动的三维性更强、端区流动结构带来的损失对风扇/压气机效率影响的程

度也更大。在小展弦比高负荷设计提出以来,国内外开展的大量实验和数值研究对端区流动结构(特别是叶尖泄漏流和角区分离及失速)在时间平均层面上的拓扑结构描述、损失大小及分布、雷诺平均意义上的非定常演化过程的模拟等方面取得了相当大的进展。但同时,这些结构的时间及空间演化过程、演化机制以及湍流统计信息,各流动结构之间非定常、非线性相互干涉等,目前仍鲜见高质量的研究成果。而从科学研究以及工程问题的角度对强三维、强非定常和非线性的端区流动结构的研究是具有很高的价值的。对这类问题的研究,以当前所能利用的工具来看,一方面可借助如大涡模拟(LES)、RANS/LES混合模拟等湍流流动的高精度数值模拟方法;另一方面可利用高分辨率流场测试方法。如果将这一研究方向展开,则在数值模拟方面,需要深入研究LES及各种RANS/LES混合方法在叶轮机内部流动模拟中的适用性、应用方法及模拟精度等问题;在实验测量方面,需要对现有接触和非接触测量方法的测量精度和空间、时间分辨率等进行详细的分析,在发展新测量方法、误差控制方法等方面开展研究。

对于未来发展推重比15~20级别的航空发动机,需要为更高负荷、更小级数、高效率、大稳定工作范围的风扇/压气机设计提供理论和技术基础。主被动流动控制技术及气动稳定性控制技术有能力大大提升风扇/压气机的气动性能,这已经在国内外大量研究中得到了证明。同时也应加强流动控制技术在风扇/压气机内流中的应用基础研究,其中包括基于流体力学的流动控制技术研究、流动控制技术的工程化研究,以及流动控制技术与风扇/压气机一体化设计技术研究等。

3.4.8 其他研究方向

1. 风力机

我国目前已经形成规模化的风电装备产业,至2010年,我国的风电新增装机容量和累计装机总容量都已成为世界第一。但是,由于缺乏风能转换过程的基础研究,机组设计技术主要依赖进口,自主研发能力严重不足。我国风能利用面临的主要科学问题有:

(1) 兆瓦级/多兆瓦级风力机组设计中的基础问题。我国风能利用和风电产业已经获得长足的发展和进步,但必须清醒地认识到:目前我国风电产业的发展主要依赖于购买国外企业的生产许可证、或委托国外企业或咨询机构设计。由于缺乏基础研究的成果,不可能实现自主创新,缺乏真正具有自主知识产权的产品和设计技术,势必严重影响着我国风电产业和风能利用的持续发展。因此需要深入开展适合我国国情的兆瓦级和/或多兆瓦级风力机组设计的基础问题研究。例如,可随不稳定风况自如变化而有效提高风力机能量捕获效率和安全可靠性的自适应风轮设计概

念,就是一个值得重点研究并有望获得自主创新的重大科学问题。

(2) 低风速兆瓦级风力机组设计的基础科学问题。迄今为止有关风能的开发利用多注重高风速风电场,而对于低风速资源的开发利用研究尚处于起步阶段。我国低风速资源丰富,且一般距电力用户近。现行的低风速风力机组大多数为小型的离网型。与高风速风力机比较,除了共性的问题之外,低风速风电机组风轮还面临风能密度低、载荷相对较小、湍流度较大、风波动频率低等特殊环境,目前尚缺乏针对此种风场的风轮设计依据。为了有效地利用低风速风能,需要探索高性价比、轻量化风轮的基本参数、结构形式及其相关特性、叶片的翼型和展向分布等问题。

(3) 海上风电相关的关键基础问题。虽然最近的研究表明,我国陆地风资源远比近海风资源丰富,但近海风资源的利用决不能忽视。海上风电机组的单机功率一般可比陆地大,尺度也大。除了与陆地风电场的共性问题之外,海上风电场还面临着:复杂海风条件下大尺度多兆瓦级风电机组设计中的基础问题;风电机组基础设计中的力学问题;盐雾引起结构和部件的腐蚀问题;风、浪、海流等对风电机组和结构的作用和影响问题等。

(4) 风力机共性问题。主要包括:复杂风场条件下风轮的自适应能量吸收机理与特性研究;多兆瓦级自适应风力叶片及翼型设计理论与方法研究;多兆瓦级自适应风力叶片非线性动力学问题研究;复杂气候条件下风力机组安全可靠运行的基础问题研究;近海规模化风能捕获形式的基础问题探索研究;专用翼型设计与翼型的风洞试验研究;风力机流动控制技术研究;基于确定性和非确定性数值模拟的不同地域、复杂地貌、规模化风电场出力预报理论和方法研究。

2. 泵

泵在石油、化工、能源、电力、国防军事领域起着重要的作用,其性能呈现高参数化,运行条件呈特殊化、极端化趋势。例如,超超临界锅炉给水泵、高压油田注水泵和焦化装置高压切焦泵的功率大、转速高且叶轮级数多,机组运行稳定性和可靠性是首要问题;其次,用于武器发射系统的泵喷系统不但功率大、流量大,其最大特点是工作于快速启动的极端瞬态工况,泵喷系统瞬态动力性能关系着系统战技指标;最后,大型灌溉泵、船舶泵喷系统和其他大型泵组也常处于偏工况运行、频繁启停、变工况等极端条件下运行,保证这些过程的可靠性是一个关键问题。开展泵内部非稳定流动机理及控制的研究,主要包括大型离心泵内部间隙流动及其与转子耦合特性、不稳定运行机理和瞬态运行机理,叶轮与导叶动静干涉、瞬态过程动力特性和内流机理、内部流动控制等。

对极端条件下液体流动、介质流动过程中的物理化学性质变化、依赖于涡结

构的流场控制、瞬态过程稳定性的研究还很不完善,特别是极端条件下含物化性能变化因素的液态介质流动特性、模拟和系统性能预测等问题。理论研究相对滞后于工程技术发展的现象,使人们还难以充分把握极端环境下的无运动部件的泵送特性与可靠性。极端条件下取得流体流动理论的新成果,促进内流流体流动学科的新发展。泵系统的优化运行是当前泵系统管理运行现代化的发展趋势,利用计算机技术对泵系统进行管理和自动控制,以提高设备工作效率和可靠性。

抽水蓄能电站中最关键的部件就是水泵水轮机,其工况复杂多变,存在启动、停机、机组飞逸、甩负荷等瞬态过程,由于瞬态过程机理不清楚,机组经常会出现过大的压力脉动、机组振动、噪声、机械失效等问题。现有的研究主要基于传统的过渡过程理论,侧重于一维特征线法的理论研究及定常工况的流动研究,在压力管道设计及水击预测方面有较好的应用,但是无法考虑三维流动的瞬态效应及流固耦合的问题,瞬态过程的内流机理以及在非定常水动力作用下的转子动特性不清楚,从而也无法解释并指导工程中出现的上述问题。因此,针对水泵水轮机瞬态过程,进行瞬态过程内部非定常三维流动机理研究,机组与长引、尾水管道的压力脉动过程耦合分析及试验研究,以及基于液固耦合的机组转子动态特性研究,对推进水力机械内部流动理论的发展有重要作用,这是水力机械内部流动的前沿课题。

泵在运行过程中,由于工况变动的缘故,叶轮进口冲角偏离设计值,叶片表面的局部区域可能出现压强过低,从而引起空化现象。短暂的空化会引起叶轮噪声和震动,而长时间的空化造成叶轮表面汽蚀,严重的甚至造成破坏性的影响。因此,建立其考虑空化作用的水泵叶轮反问题设计具有十分重要的意义。在叶轮设计目标中,综合考虑设计点的水力性能与空化数的限制,通过设计合适的载荷分布可避免空化的产生。

随着泵的高速化、大功率化,噪声和振动成为新的研究重点和热点。揭示离心泵内部非定常流动诱导振动与噪声产生的机理及规律,为离心泵的主动减振降噪提供理论基础,获得低噪声低振动设计方法。

抽水蓄能电站大型可逆水轮机设计和水力性能研究,覆盖偏低水头可逆式转轮三维设计和偏高水头可逆式机组导叶极小开度流动特性研究。将感性认识和设计经验提升为基础理论和对机理概念的认识,如寻求叶片设计的几何参数和效率、机组性能和稳定性之间的内在关系和规律;借鉴和发展诊断手段,如将局部涡动力学理论的分析方法应用到内部流动诊断中。

核电发展市场潜力大,目前国内在役和在建的核电站和核潜艇用核主泵,其核心技术均非我国开发。从在役的核主泵运行状况来看,核主泵的轴功率在4000 ~ 8300kW,且要求其常年不间断运行,其运行效率的提高具有重要的节能

意义。

综上所述,从前面叙述的普通泵和特殊泵面临问题的本质特征看可归纳成:①高效/稳定/全工况的设计体系的建立;②兼顾交叉学科解决噪声和强震动;③输运介质与特殊要求不同引出的特殊问题。上述问题的集中体现在湍流结构的认识、湍流模型的适应性、流动失稳机理、气/液/弹/固/声的耦合机制、自主知识产权设计体系建立。面临的科学问题归类如下:

(1) 水泵内部流动机理的研究。通过理论分析,尤其是涡动力学的理论和方法,以及数值计算和试验量测,研究分析泵内研究“功能转化”力学特征量的描述和表达及其时空演变的基本特征、“功能转化”特征量与几何参数的关系。在水泵内部流动中,需要对目前尚未深入研究的问题进行深入探讨,例如,旋转湍流生成与演化机理不清,空化的初生和发展与流场结构关系不清,叶片分离流与涡流的形成机制研究不够,流动问题的实验研究不够。应该在理论上要解决的问题还有:考虑旋转效应的多尺度湍流模型和空化模型,建立水力机械流动结构与几何形状的关系。

(2) 各种工况下,包括非设计工况、空化及多相流工况下,各种瞬变工况中,“功能转化”特征量的变化及演变的特征和规律的研究。其中问题为对暂态过程的许多水力现象认识不足,缺少理论模型,难以解释工程出现的瞬态问题;瞬变流动与系统的耦合作用机理研究较少,为此要建立暂态过程的瞬变流动理论和方法,建立机组动态参数与瞬变流动发展的关系。

(3) 泵送系统的表达及其基本控制方式和规律的研究。目前对在泵送系统中的水力系统、机械系统、电气系统、支撑结构系统进行了分割研究,系统动力学理论存在缺陷,而且各子系统之间的耦联关系不清,为此要发展耦合系统动力学理论,建立系统参数的耦联机制,提出系统稳定运行控制方法。

(4) 泵的重要部件,如轴系、轴承、密封和平衡装置的力学特性及与泵的性能的耦合关系研究。

(5) 基于环量分布特征的高效设计方法研究。在高比转速混流叶轮内部,存在着二次流、分离流和局部各向异性湍流特征,传统的设计方法对三维、有旋湍流流动进行了简化,设计的结果并不能达到最佳的效果。如假设来流绝对运动无环量,则流场内处处无旋,显然与真实情况有较大的偏差。在真实流动中,叶轮进口、流道内、导叶出口,均存在着不同程度的环量,如何将这一真实流动中出现的现象融入设计方法,将是以提升泵的能量性能为目标而进行新设计方法探索的重要途径。

(6) 非设计工况下叶片表面的应力分布求解研究。依据理想流动工况设计出的混流泵,其叶轮内部流动速度的大小和方向沿泵内流道缓慢变化,叶片表面

的负荷分布有一定的规律性。而核主泵的运行中,会因一些偏离设计工况的出现而引发叶片表面受力分布特征的急剧变化,这是评估核主泵稳定性的一个关键因素。能否在非设计工况下精确捕捉靠近叶片表面的流场瞬态特征,从而反推叶片表面的应力参数将是获得合理、准确的叶片表面应力分布的关键。

(7) 准球形壳体内部三元湍流流动结构分析及其能耗因素研究。结合导叶出口的流动特征,联系准球形壳体的特殊结构形式,可预测准球形壳体内部存在着较大的水力损失,但准球形的几何形状不易导致由于高压引发的局部应力集中。准球形壳体内部流动异常复杂,旋涡、撞击、回流等多种因素共存,是否能对其内部复杂流动进行简化的描述将是决定是否能设计出有效方法来减轻其水力损失的重要因素之一,也是定量预测准球形壳体产生的能耗大小的主要手段。

(8) 热态条件下的流场与固体应力场求解。对目前的实验手段及实验方法进行可行性分析,核主泵在热态条件下(泵内流体温度 $280\sim 320^{\circ}\text{C}$),其内部流场和固体的应力参数分布是无法进行瞬态测试的,只能借鉴数值模拟的手段。在混流式核主泵叶轮内,既无法给定叶片在热态条件下的振动规律,也无法单方面给定流体动力载荷来分析叶片的动力响应和稳定性。目前,流固间作用问题的求解与解的精度尚存在诸多难点,但混流式核主泵叶轮内的流固相互作用问题直接影响着整个机组的稳定性。

其他基于水力学原理的水下推进技术、水下航行器的设计及流态分析、减阻降噪技术、自然空化超空泡和充气超空泡的形态和发生技术的研究探索是值得关注的主要内容之一。

3. 基于仿生学原理的节能降噪叶轮机械的基础研究

作为新兴学科的仿生学,在气动控制方面,通过模仿海洋生物及土壤生物表皮结构有效地改善了飞机机翼气动特性及减小了管道流动壁面摩擦阻力。为进一步将极具潜力的仿生学原理应用到叶轮机械节能降噪方面,特别是对风电叶片的气动控制和设计,建议开展以下几方面基础性研究:

- (1) 基于仿生学原理的叶片抑制流体分离与失速机理及优化研究;
- (2) 基于仿生学原理的非光滑表面结构叶片减阻研究;
- (3) 特定环境条件下基于仿生学原理的叶片减阻增升研究;
- (4) 基于仿鲸鱼鳍叶片气弹噪声优化控制研究。

3.4.9 学科交叉与拓展方向

学科交叉与拓展方向表现在以下方面:

- (1) 生物流体力学。自然界中的许多生命现象与流体流动过程密切相关,

如鱼类摆尾游动具有效率高、噪声低、尾迹小、隐身效果好等优点,是十分理想的流动推力型运动方式,而海洋探测器、鱼雷等水下航行是流动阻力型运动方式,必须依赖推进系统提供动力才能前进;再如,昆虫翅扑动的飞行过程巧妙地利用周期性涡脱离产生非定常高的升力,其平均值是定常值的2~3倍。近期的生物流体力学研究还主要以机理认识为主要目标,具体研究方向包括:鱼游及昆虫飞翔等柔性大变形过程的流固耦合模型及有效的数值求解及实验测量手段;血液流变学的微观动力学过程及其宏观表象;生物体内气液弹耦合动力学模型及实验技术;人工心脏泵及植入物的设计等。在此方面的研究工作将对研制先进飞行器、深海勘探器、人工脏器、生物芯片等应用产生积极的影响。

(2) 与信息领域的交叉。在过去的半个世纪中,信息科学与技术发展迅猛,已成为人们获取新知识、新思想、新方法的重要研究手段,极大地促进了人类文明的进步。在热机气动热力学及流体机械领域,信息技术将在先进实验测量方法、高可信度计算流体力学、主动流动控制技术等方向上有望取得突破性进展,值得强烈关注。

(3) 物理化学流体力学。许多看上去不同的复杂流动现象实际上遵循着相同的物理、化学运动规律,研究流体流动对物理、化学及生化过程的影响以及这些力反过来对流动的影响,是理解流动系统中质量、动量、能量、电荷传递行为共同性的基础,也是高能物理、化学工程、生物制药、材料制备、微机电系统等应用的关键。在学科领域中,高能系统的热流问题、电磁流体力学、多尺度流体力学,以及微重力流体力学、稀薄气体、非平衡流体力学等是前沿研究热点。

(4) 现代系统工程理论在学科中的应用。从系统的观点看,燃气轮机及航空发动机是由压气机、燃烧室、涡轮为核心部件,通过精确的、能全面协调的总体集成匹配技术形成的高科技产品。此外,大型热机与流体机械机组常年处于非设计工况下运行,实际运行效率比最高效率点低20%~30%的情况不胜枚举,提高机组与系统效率的任务十分艰巨。此外,建筑物采光、热水、空调等能源消费日益升高,系统节能潜力巨大。从系统论的角度出发,提高热机与流体机械核心部件及系统的全面、协调节能具有重要的应用前景。

3.4.10 近5年来论文发表情况分析

1. 国际期刊的论文发表情况分析

表3.1给出本领域13种国际期刊的影响因子统计情况。其中 *ASME Journal of Turbomachinery*, *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, *ASME Journal of Fluids Engineering* 与 *AIAA Journal of Propulsion and Power* 这四种刊物与

热机气动热力学与流体机械密切相关,是这一领域中公认的国际核心期刊。而 *AIAA Journal*, *Journal of Fluid Mechanics*, *Physics of Fluids*, *Journal of Fluids and Structures*, *Journal of Sound and Vibration*, *Journal of the Acoustical Society of America*, *Journal of Computational Physics*, *Computers & Fluids*, *Experiments in Fluids* 这 9 种刊物则涉及更为基础、更为宽泛的流体力学、气动弹性、气动声学、计算流体力学及实验流体力学等问题。

为全面掌握中国在热机气动热力学及流体机械相关领域的研究地位,表 3.2 给出了这 13 种期刊的论文发表统计情况 (2001 ~ 2010 年)。从统计结果看,我国正在成为热机气动热力学及流体机械研究的重要国家,有很好的发展潜力。在 2006 ~ 2010 年间,我国学者在前 12 种国际期刊上发表论文的比重均高于 2001 ~ 2005 年的比重,但在 *Experiments in Fluids* 期刊上发表论文的比重有所下降,这从一定程度上反映出了中国在先进流动测量方面的基础研究工作还有待加强,需要发挥基金的导向作用,引起本领域研究人员的认真反思。希望在未来 10 年中,抓住产业及市场提供的机遇,加大对先进实验测量手段以及高可信度计算工具的基础及应用基础研究力度,为各类热机及流体机械高端装备的发展提供基础性支持。

表 3.1 热机气动热力学与流体机械相关领域 13 种国际刊物的影响因子 (2005 ~ 2009 年)

序号	期刊名称	影响因子
1	<i>ASME Journal of Turbomachinery</i>	0.824
2	<i>ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power</i>	0.842
3	<i>ASME Journal of Fluids Engineering</i>	0.784
4	<i>AIAA Journal of Propulsion and Power</i>	1.007
5	<i>AIAA Journal</i>	1.231
6	<i>Journal of Fluid Mechanics</i>	2.698
7	<i>Physics of Fluids</i>	2.056
8	<i>Journal of Fluids and Structures</i>	1.552
9	<i>Journal of Sound and Vibration</i>	1.679
10	<i>Journal of the Acoustical Society of America</i>	1.860
11	<i>Journal of Computational Physics</i>	3.023
12	<i>Computers & Fluids</i>	1.831
13	<i>Experiments in Fluids</i>	2.008

表 3.2 中国学者在 13 种国际刊物论文发表统计情况 (2001 ~ 2010 年)

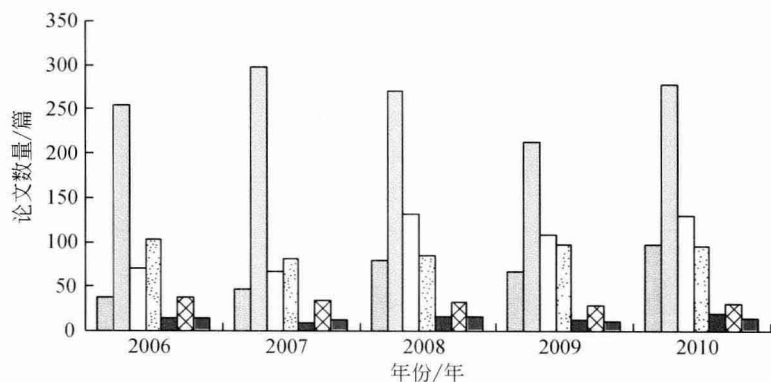
序号	期刊名称	2006 ~ 2010 年			2001 ~ 2005 年
		中国学者 论文数	论文 总数	比例/%	比例/%
1	<i>ASME Journal of Turbomachinery</i>	15	492	3.05	1.19
2	<i>ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power</i>	46	900	5.11	2.02
3	<i>ASME Journal of Fluids Engineering</i>	46	787	5.84	3.57
4	<i>AIAA Journal of Propulsion and Power</i>	30	803	3.74	1.68
5	<i>AIAA Journal</i>	81	1566	5.17	4.00
6	<i>Journal of Fluid Mechanics</i>	83	2426	3.42	1.86
7	<i>Physics of Fluids</i>	104	2520	4.13	2.98
8	<i>Journal of Fluids and Structures</i>	35	378	9.26	6.13
9	<i>Journal of Sound and Vibration</i>	499	2970	16.8	12.36
10	<i>Journal of the Acoustical Society of America</i>	153	3749	4.08	3.71
11	<i>Journal of Computational Physics</i>	199	2308	8.62	3.68
12	<i>Computers & Fluids</i>	56	668	8.38	5.70
13	<i>Experiments in Fluids</i>	17	821	2.07	3.94

2. ASME-GT 国际会议论文统计与分析

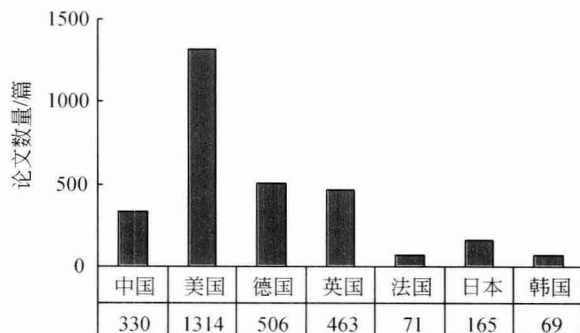
美国机械工程师学会燃气轮机分会 (ASME-GT) 每年召开一次学术交流与技术展览国际会议, 这次会议是全世界热机与流体机械相关领域的企业、科研院所、用户的最重要的技术交流平台。ASME-GT 会议论文覆盖了航空发动机、燃气轮机、汽轮机、涡轮机、压气机/风扇、风力机、电机等产品对象, 代表着热机与流体机械学科在材料、燃烧、传热、流动、结构、控制等方向上的最新研究进展及未来技术发展趋势。表 3.3 及图 3.5 给出了主要国家在近 5 年来的 ASME-GT 论文统计情况, 可以看出, 2006 ~ 2010 年, 中国在 ASME-GT 发表的论文总量已稳居第四位; 从 2006 年开始, 中国的论文数量呈现逐年上升趋势, 与德、英两国逐年接近, 甚至在 2010 年 (98 篇) 超过了英国 (96 篇) 高居第三位, 但与位居第一的美国相比仍有很大的差距, 中国近 5 年的论文总量约为美国的 1/4。但是, 可喜的是近 5 年中国的论文数量上升势头迅猛, 2010 年中国的论文量为 98 篇, 已经超过了美国该年论文数量 (278) 的 1/3。加大基金的国际合作交流的支持力度, 鼓励更多的研究人员参与重要的国际学术会议, 相信在未来的 10 年中我国学者在热机与流体机械学科领域的国际影响力不可限量。

表 3.3 中国学者在 13 种国际刊物论文发表统计情况 (2001 ~ 2010 年)

年份 国 家	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	累计
中国	38	47	80	67	98	330
美国	254	298	271	213	278	1314
德国	71	66	131	108	130	506
英国	102	82	85	98	96	463
法国	14	9	16	12	20	71
日本	38	35	33	28	31	165
韩国	14	13	16	11	15	69



(a) 逐年统计



(b) 总量统计

图 3.5 主要国家的 ASME-GT 会议论文统计分布

参考文献

- [1] 国家自然科学基金委员会工程与材料学部. 学科发展战略研究报告(2006~2010)——工程热物理与能源利用. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 席光, 张楚华, 刘波, 等. 热机气动热力学与流体机械发展研究专题报告//工程热物理学科发展报告(2009—2010). 北京: 中国科学技术出版社, 2010.
- [3] 岳珠峰, 李立州, 虞跨海. 航空发动机涡轮叶片多学科设计优化. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] 王建军, 李其汉. 航空发动机失谐叶盘振动缩减模型与应用. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [5] 杨敏官, 王军锋. 流体机械内部流动测试技术. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [6] Greitzer E M. Some aerodynamic problems of aircraft engines-fifty years after. ASME-GT2007-28364.
- [7] Sato S, Jovanovic S, Lang J, et al. Demonstration of a palm-sized 30W air-to-power turbine generator. ASME Journal of Engineering for Gas turbines and Power, 2011, 133: 102301.
- [8] Denton J D. Some limitations of turbomachinery CFD. ASME-GT2010-22540.
- [9] Zhang W, Zhang C H, Xi G. An explicit Chebyshev pseudospectral multigrid method for incompressible Navier-Stokes equations. Computers & Fluids, 2010, 39(1): 178—188.
- [10] Jacobsen D A, Thibault J C, Senocak I. An MPI-CUDA implementation for massively parallel incompressible flow computations on multi-GPU clusters. AIAA-2010-522.
- [11] Voges M, Beversdorff M, Willert C, et al. Application of particle image velocimetry to a transonic centrifugal compressor. Experiments in Fluids, 2007, 43: 371—384.
- [12] Lin F, Du J, Chen J Y, et al. Flow structures in the tip region for a transonic compressor rotor. ASME-GT2010-23025.
- [13] Hodson H P, Hynes T P, Tan C S, et al. A physical interpretation of stagnation pressure and enthalpy changes in unsteady flow. ASME-GT2009-59374.
- [14] Castanier M, Pierre C. Modeling and analysis of mistuned bladed disk vibration: Status and emerging directions. AIAA Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 384—396.
- [15] Morini M, Pinelli M, Venturini M. Development of a one-dimensional modular dynamic model for the simulation of surge in compression systems. ASME Journal of Turbomachinery, 2007, 129: 437—447.
- [16] Spakovszky Z S, Roduner C H. Spike and modal stall inception in an advanced turbocharger centrifugal compressor. ASME Journal of Turbomachinery, 2009, 131: 031012.
- [17] Verstraete T, Alsalihi Z, van den Braembussche R A. Multidisciplinary optimization of a radial compressor for microgas turbine applications. ASME Journal of Turbomachinery, 2010, 132: 031004.

- [18] Wang D X, He L. Concurrent aerodynamic-aeromechanic design optimization for turbomachinery blades using adjoint method. ASME-GT2009-59240.
- [19] Luo J X, Xiong J T, Liu F, et al. Three-dimensional aerodynamic design optimization of a turbine blade by using an adjoint method. ASME-GT2009-60115.
- [20] Keane A J. Comparison of several optimization strategies for robust turbine blade design. AIAA Journal of Propulsion and Power, 2009, 25(5): 1092 — 1099.
- [21] Sugimura K, Jeong S, Obayashi S, et al. Multi-objective robust design optimization and knowledge mining of a centrifugal fan that takes dimensional uncertainty into account. ASME-GT2008-51301.
- [22] Simpson T W, Toropov V, Balabanov V, et al. Design and analysis of computer experiments in multidisciplinary design optimization: A review of how far we have come-or not. AIAA-2008-5802.
- [23] Yuan X, Tanuma T, Zhu X F, et al. A CFD approach to fluid dynamic optimum design of steam turbine stages with stator and rotor blades. ASME-GT2010-22477.
- [24] Cumpsty N A, Horlock J H. Averaging nonuniform flow for a purpose. ASME Journal of Turbomachinery, 2006, 128: 120 — 129.
- [25] Wang X Y, Sun X F. A new segmentation approach for sound propagation in non-uniform lined ducts with mean flow. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(10): 2369 — 2387.
- [26] Diganta P N, Gao Z H, Shantanu M, et al. Effect of unsteady wake on film-cooling effectiveness distribution on a gas turbine blade with compound shaped holes. ASME-GT2007-27070.
- [27] Na S, Shih T I. Increasing adiabatic film-cooling effectiveness by using an upstream ramp. ASME-GT2006-91163.
- [28] Dawes W N, Kellar W P, Harvey S A. Towards cooled turbine life prediction via concurrent aerodynamic, thermal & material stress simulations on conjugate meshes. ASME-GT2010-22482.
- [29] Bunker R S. Gas turbine heat transfer: 10 remaining hot gas path challenges. ASME-GT2006-90002.
- [30] Ding H, Visser F C, Jiang Y, et al. Demonstration and validation of a 3D CFD simulation tool predicting pump performance and cavitation for industrial applications. ASME Journal of Fluids engineering, 2011, 133: 011101.

第4章 传热传质学

4.1 学科内涵、学术意义与应用背景

4.1.1 概述

经典传热传质学以研究由于温度差和物质组分浓度差异所引起的能量传递过程和物质迁移现象为主导,在形成相对独立学科体系后的近100年,是几乎渗透到现代工程技术各个领域内的一门技术基础学科。热质传递过程作为物质运动的一种普遍形式,有着无所不在的广泛实际应用背景,在与各个行业和学科广泛融合、相互促进发展的历史中内涵不断得到丰富,范畴持续迅速拓展,尤其与现代产业和高科技的发展紧密交叉,在许多相关学科和高科技领域中扮演着重要角色,甚至起着关键性作用。传热传质学基础理论与应用研究一直呈现出勃勃生机,成为国内外工程热物理与热流体科学领域十分活跃、发展迅速、与其他学科方向形成普遍的深层次交叉融合的分支之一。

传热传质学以刻画微观粒子随机性行为统计性质的热学理论为基础,针对导热(扩散)、对流(传质)和辐射的基本热、质传递形式,以及基本形式的耦合和衍生产生的传递现象和过程,反映或揭示其中的能量与物质传输的宏观唯象规律,融入相关工程技术各领域应用上述规律产生的应用科学和特征参数间的经验关系,构成传热传质学基本的学科体系。人类对自然世界与基本现象更为深刻和全面的认识,基础科学日新月异的理论突破,认识和掌控自然世界技术理念与工具的持续创新,或多或少都延伸、拓展或更新着传热传质学科的理论基础、技术应用理念以及探讨和认识规律的思维方式等。当我们站在现代科技发展前沿,以新的视角审视和分析这一学科的研究基本态势、演变和未来趋向时,需要认真考虑综合发展的背景、动机、现状、可依赖的基础和因人类的好奇所带来的新发现。

4.1.2 学科内涵

1. 导热和扩散传质

导热是温差驱动下在介质内部或介质之间无相对宏观位移时,通过接触,以

微观粒子,包括分子、原子、电子、声子,甚至光子及其他微观粒子运动和相互作用传递能量的一种传热形式。相应地,扩散传质则是浓度差驱动下在介质内和介质之间以基本粒子运动进行物质迁移的过程。导热的主要内容主要包括介质的导热机理、导热传输热物理性质、导热传递过程特性、导热正反问题求解、界面与接触导热、耦合导热、相变导热等;其当前的发展趋向为:导热微观过程与机理、新材料(介质)传输热物性、界面与接触热阻、微纳尺度与极端条件导热理论与微观机理、经典理论的局限与新拓展、多过程多相耦合导热、非均匀介质导热、加工与工艺过程中的导热等。扩散传质的研究内容主要包括介质的扩散传质机理、扩散传质的热物理性质测定和预测、介质界面吸附和传递特性等;其当前的发展趋向为:扩散传质机理的介观和微观诠释、新材料(介质)扩散传质特性的设计和控制、多孔介质多组分复杂扩散等。

2. 对流传热

对流传热是存在温差的介质(通常为流体与固体)间由流体流经另一介质表面进行能量交换的一种传热形式。显然,对流传热过程中必然伴随有导热甚至热辐射。对流传热十分复杂,不仅受介质间界面的几何形态、热物理条件、相对关系等因素的影响,还与流体的流动起因、流体的热物理性质、流体流动的状态、尤其是复杂的湍流结构等因素有关。相对于另外两种传热形式(导热和辐射),对流传热似乎更具有经验性和不确定性。对流传热研究内容非常广泛,主要包括自然对流、强迫对流传热、混合与耦合对流传热、射流冲击传热、外场作用下的对流传热、微对流传热、相变对流传热、多相多组分流动与反应传热、换热器理论与技术、对流传热强化、相似理论与实验方法等,其中又各自蕴含着丰富的内涵和难以预测的外延。目前,研究在保留了经典方向的深化和再认识拓展等内容外,多数趋向于复杂和交叉领域,例如,极端和复杂条件下的对流传热、多场(多因素)驱动与非线性耦合的对流传热、界面和边界区微细对流结构与传热、多相反应对流传热、相变界面机理和传热、传热强化理论与应用、复杂多相流对流传热、高科技交叉领域对流传热(如微重力相变与对流传热、微尺度对流传热、生物流动与传热、纳米通道选择性流动与传质)等。

3. 辐射传热

辐射传热通常用来描述由于电磁波引起的热量传输的科学。在工程上常遇到的温度范围内,热辐射的能量主要集中在 $0.1 \sim 1000\mu\text{m}$ 波长,可分为紫外线($0.1 \sim 0.38\mu\text{m}$)、可见光($0.38 \sim 0.76\mu\text{m}$)和红外线($0.76 \sim 1000\mu\text{m}$)三部分。通常 3000K 以下的红外辐射在国防科技、动力、化工、材料等工程领域应用

更广。热辐射按研究内容可分为表面辐射、粒子辐射、介质（气体、半透明固体或流体）辐射、耦合换热、辐射热物性、热辐射反问题、微尺度辐射换热等。上述热辐射研究内容可归纳为两大类：热辐射特性和热辐射传输。辐射传热的发展趋势为：一是研究内容的深化；二是多趋向复杂和交叉领域，如浓相粒子群非独立散射、各向异性散射、热辐射与湍流相互作用、高温弥散介质内红外探测、气动光学、多场耦合下辐射传热、极端条件下辐射特性与传输、微尺度下辐射传热（包括纳米物体尺寸和飞秒时间尺度）、非平衡态气体辐射特性及传递、非均匀介质内的辐射传输、生物组织内的辐射传递等。

4. 交叉领域

传热传质学研究中最基本的物理参量是温度和浓度，传热过程发生的前提是存在温度梯度，传质过程发生的前提是存在浓度梯度。温度及浓度变化引起的各种物理化学过程都涉及传热传质，探究热质传递现象、规律以及对过程影响作用等均属于传热学范畴。从这种意义上讲，传热传质交叉学科可用 heat and mass transfer-X 加以概括，其中 X 代表各种可能的情况。实际上，当前几乎所有重大科学研究领域，如生命、能源、环境、信息等科学中都能找到与传热传质学千丝万缕的联系。客观地说，要完整地描绘出传热传质学交叉领域的全貌相当困难，也正因为如此，更凸显出该学科所具有的巨大发展空间和潜力。当今传热传质学领域内典型的交叉研究均可归结到三大类方向，与生命科学相结合而产生的生物传热传质学，由微/纳米科技催生出的微米/纳米尺度传热学，以及与其他一些高新技术领域（如新能源）相融合而提炼出的新兴学术方向。从所涉及的基础科学问题看，这三个交叉学科方向均涉及各向异性介质中多尺度、多相传热传质学，近年来的发展十分迅速，成为整个学科极具前景的新增长点。事实上，传热传质学发展历史所展现的正是交叉发展的历程，在与其他学科交相辉映和协同发展中，其自身的研究内涵不断丰富。现代经济建立在科学与知识的基础上，交叉问题研究总是与各个时代科技发展的前沿紧密结合，交叉学科为此做出的贡献非常独特而有力，重视传热传质学交叉科学问题探索具有特别重要的意义。

4.1.3 前沿背景与动机的演变

过去5年传热传质学研究在国内虽无根本性变化，但结合国际学术界的总体趋势分析，仍可看出悄然无声中形成的巨大差异。在国家自然科学基金委员会“十一五”的战略报告中，传热传质学科的发展背景和推进动机主要体现在基础探索内涵的延续、传统产业技术创新的需求、高新科技基础的前端支撑、探求自

然现象本源的驱动等 4 个方面。与之相对比, 学科研究的大背景和动机明显地有了实质性改变, 传热传质和基础传递现象的研究更多地关注和服务 5 个方面的基础现象和能量转换传输规律, 包括能源系统、生物医学、公共安全、信息光电技术、纳米科技等。显然, 研究的深度、广度和难度已呈几何级数增长, 不仅要求传热传质学在学科基础理论和观念上有所突破, 提供全新的能量转换机理、传输规律, 还要求开拓崭新的技术思路和计算方法, 以应对人类社会发展史上前所未有的挑战。

现将上述 5 个方面的基础现象和能量转换规律详述如下:

(1) 能源问题不仅仅是一个简单的经济建设和人类生活的物质基础, 已上升到有关国家社会经济安全战略, 与地球环境和生态安全相关联甚至更有威胁人类生存的危机。世界各国, 尤其是西方发达国家毅然从传统的能源利用和节约内涵上, 转向对能源与环境更为广泛和深度影响的考虑, 涉及能源资源、储存、运输、转换和生态友好后处理等全方位的基础和技术创新探索。显然, 针对能源和能源系统的传递现象研究, 已远非强化或弱化传热、高效传递与利用率(或有效保温)等那么简单。

(2) 无论是健康、能源还是与环境相关的各个领域, 要完成从分子到系统各层次上现象的认识和理论的实际应用, 无不涉及传递现象。例如, 如何将生物体内细胞、组织、器官和机体各层面上的与能量相关的基础代谢现象和科学规律有机融合, 建立起环境(外界)与系统或局部的内在联系。这里的挑战巨多, 有跨学科的语言表述、思想方法和理论基础等方面的极大差异, 还有生物医学研究对象和方法(生命现象、过程与规律的微、介观认识及研究方法)和传统传热传质学研究对象和方法(机械体间宏观、唯象认识和研究方法)间的冲突, 以及复杂生命体要求建立不同空间和时间尺度上的复杂系统集成等。21 世纪是个生物医学蓬勃发展的时代, 它赋予了传热传质学科一个有可能用于揭示生命本质与能量之间关系的机遇, 因而产生极富挑战的崭新的研究方向和重要的创新性的基础理论和技术原理等。

(3) 传递现象和国家公共安全问题紧密联系在一起, 体现于有害气体或颗粒的探测处理、生物化学快速探测技术或传感器发展、国家战略目标和公共基础设施防护等诸多方面, 包括了广泛的工程技术领域和学科, 如传感器探测(Lab-on-chip sensors)微流体学, 大气和建筑内空气质量实时监测、火灾动力学、检测技术和工具开发校验等。这些领域中所涉及的传递现象和通常经典认识已有很大不同, 所要求的认识深广度更是超越了经典理论框架。

(4) 信息和光电技术中的传递现象仍然是与高发热散热、系统热管理与能源利用相关。实际需求所带来的持续的装置功率增大, 造成了更大的元器件发热

率,不可避免地产生局部高发热率和整体散热水平的提高,不断提升的可靠性要求、进一步的高集成、小尺度和轻量化趋势犹如雪上加霜,与许可的低运行温度和均温性要求形成尖锐的矛盾,同时面临低成本、低能耗和生态环境友好的压力,都极大地挑战着当今的能量消耗转化、传输、回收和利用等经典理论,期盼着高转化率、低耗损、快速散热、有效回收或新的转换利用基础概念和技术理论。高超声速飞行器的研制更是热科学与技术带来诸如超高热流密度热防护、热设计和热管理等前所未有的挑战与课题。

(5) 毫无疑问,传递现象在纳米材料和器件性能确定和科技的创新应用中扮演了十分重要的角色,而且纳米科技本身所带来传递现象和过程规律又为学科内涵的创新带来前所未有的生机活力。特殊的界面传递现象、微观能量载子性质、传热传质等微观传递机理等,都是崭新的科学问题,而测量和实验技术、从纳米性质和纳米尺度过渡到宏观集成、产品器件的纳米加工等则是解决实际应用的关键。这些研究探索将对纳米尺度能源储存、转换和利用、材料制备与加工、感应器、生物和健康、水处理等产生革命性影响。

4.1.4 机遇与挑战

科学的飞速发展和工程创新日新月异的进步不断孕育出崭新的技术,对工程领域提出挑战,当然也包括传热传质学科。基于近年学科前沿背景和需求的演变,必然要重新认识和明确传递现象的挑战和机遇,突出的方面可以总结归纳为如下几个方面:

(1) 以微观粒子随机统计的热学理论基础受到挑战,对应前沿科学和技术的微观化自然现象本质探索和理论形成,如分子、细胞生物学理论、纳米物质特性与材料制备加工,基于微观能量载子的新能源转化等,需要考虑基于微观粒子性质的传递现象和过程规律,发展传热传质学科新的基础理论和学科体系构架。

(2) 传热传质机理的探索,已经开始从系综体系的统计性质转向量子化微观能量载子的基本性质、能量转换、交换、传输现象和规律,以此描述和确定系统宏观传递特性,也将可能产生出新的能源系统概念和转化利用形式,其中包括揭示生命能源系统物理基础和功能特性,生命体内的疾病状态与能量传递的关系,以及与环境间的相互依存和关联。

(3) 产生的特殊界面传递现象整体性的改变经典理论认识,不仅要以界面结构、能量载子性态来探讨界面传递现象,更要针对不同空间和时间尺度进行界面跨接和性能认识,尤其不同尺度物理场和规律的相互作用,像生物体从分子、细胞、组织、器官到系统,而纳米材料的颗粒到体相,传输机理从能级跃迁的光子速度、声子迁移到能量载子扩散运动等。

(4) 以微观和纳米粒子特性发展的传热传质技术理论和方法, 将是学科工程应用和技术创新的热点之一, 包括生物医学技术、公共安全检测和防护、水和空气体分离与净化、传感器件、纳米功能传递(或隔热、绝热)材料、创新能源系统、储能或温室气体处理材料和介质等。

(5) 新型能源转换和利用系统中的传递现象包含了区别于经典热功转换的一切转换形式或途径, 如热电、电化学、电磁光热等转换形式和过程等, 其中可以基本粒子能级变化、离子以及分子原子反应、光电子转换等实现, 这其中粒子传输和相互作用主导了能质传递过程特性, 是崭新研究内容。

(6) 多学科交叉传递理论和实践。

社会经济迅猛发展的今天, 衍生出信息、生命、纳米等 21 世纪的主导科学和技术前沿, 全面更新人类的思想观念, 改变着人们的生活方式, 需要相应地充实和构筑符合潮流、适应发展的知识与学科体系。毫无疑问, 传热传质学研究面临ings的主要任务和方向应是, 为社会经济发展、科学技术主流走向与人类生活需求服务的学科经典理论、知识体系和技术应用全面充实、深化; 与现代科技发展融合的交叉领域; 应对基础科学认识不断进步和高科技发展的持续开拓创新。

4.2 国内外研究现状与发展趋势

4.2.1 概述

国际上传热传质学研究的范围和内涵近年明显拓展和延伸, 显示出该分支学科在各个领域的重要性的学科发展朝气蓬勃的新气象。呈现出的整体趋势有两个方面: ①积极结合需求, 用现代思想观念和科学理念再认识传统内涵, 发现新现象新规律, 拓展、深化传热传质基础理论; ②探索和开拓新的研究方向与领域, 更加务实地注重应用现代科学前沿成果, 与高新科技形成广泛交叉, 集中攻克重大科技发展关键。传热传质学基础理论研究远远超越了三种基本形式的原有内涵, 导热更多关注新的微观机理和对傅里叶经典理论的影响、热学新概念及其应用; 对流传热则引进界面热毛细和微势差流动、多场多因素耦合驱动、相间强非线性和非平衡作用相变传热、多空间和时间尺度等问题; 辐射传热除从微观与量子角度考察表面与复杂介质内的辐射特性外, 高强度高频率脉冲与单色定向射线的辐射、辐射与各种过程和物理化学变化耦合等传热传质都给予高度重视。研究方法与实验手段不断丰富, 各学科的基础理论和内容互相渗透和交叉, 尤其是基础学科的最新成果、理论应用和引进, 不仅进一步扩

充了学科的理论基础和研究手段,也拓展出崭新的思路 and 方向,像数值模拟和现代高科技显示测量等,已是传热传质研究中观察显示物理特性的强有力手段,得到广泛应用。

国内传热传质研究近年发展十分迅速,所涉及的内容涵盖基础理论的方方面面,涉及经济建设和国防科技的各个行业与领域^[1,2]。基本现象与理论的进展分布在不同方面,主要有导热和传输物性微观机理与分子模拟;对流传热的耦合与非线性现象;热与流动、多场多因素相互作用及传热强化理论;常规与复杂条件下相变机理和气泡动力学;微纳时间及微纳尺度物质和能量输运现象认识;复杂表面与介质辐射特性和换热;生物与生态传递现象、多孔介质传热传质等。应用基础和应用技术包括单相与相变传热强化技术与应用、激光加工与材料制备传热、新能源和环境保护中的传热传质技术、能源高效转换与储存技术、航空航天热管理与电子器件冷却技术、多相多组分复杂传热传质应用、物料与生物食品干燥、建筑节能与冷热贮存技术、低温制冷与环保工质传热传质、自然生态与地质资源中的传热传质问题等。

国内研究在紧跟世界学术潮流、力争局部创新突破的同时,在工程热物理学科内各分支学科和其他各学科的交叉,与各种高新技术发展、现代产业结合,涉及生态环境、资源开发利用、国家战略性基础建设和重大计划等方面的对流传热基础研究,取得了突出的成就,为未来发展奠定了强有力的基础。经过多年努力,国内在不少基础创新研究点上取得了国际学术界所公认的成果,应用技术研究涉及面宽广,成效显著,包括对国家重大工程及基础攻关课题都做出了杰出的贡献。但总体上讲,基础理论研究原创性、系统化和深度与国际学术发展相比有明显的差距,应用基础和技术多停留在传统内容层面,较少涉及直接服务于高新技术或直接在高科技发展中发挥关键性作用。

4.2.2 导热

1. 微观机理再认识和描述

导热基础理论研究近年来依然主要集中在微观机理的认识和直接理论描述方面。随着超快速激光加热技术以及 MEMS/NEMS 等微纳科技的发展,导热过程在时间尺度、空间尺度、环境温度以及热流密度等都在向极端状况扩展。飞秒/微纳时空尺度下能量载流子的迁移和导热规律的研究是传热学发展新的重要研究方向,空间和时间尺度微小化的影响,如纳米颗粒、纳米薄膜等导热规律明显偏离已有的体材料特性,并呈现各向异性或非均匀性等特点,作为物性的输运系数凸显出强烈的尺度相关性,相界面和接触界面热阻逐成焦点,虽然有许多研究者采

用分子动力学模拟、直接求解玻尔兹曼方程等方法从微观粒子性质和运动揭示导热规律和相关输运特性,但是应用量子凝聚态物理最新成果、尤其是引入微观物理和能量载流子实验观测和验证新现象和过程特性十分必要。

与此同时,随着材料科学的发展,半导体在热设计上的应用越来越广泛。基于塞贝克效应的热电转换和基于珀尔贴效应的热电制冷是目前国际前沿的重大研究领域之一。研究发现通过降低晶格导热系数的办法可以将决定半导体热电转换效率的优值系数提高到2以上,但是国内从工程热物理角度开展的相关研究还几乎处于空白状态。热电转换效率受到热电材料优值系数的制约。优值系数与材料的塞贝克系数和电导率成正比,与材料的导热系数成反比^[3](见图4.1)。目前国际上的研究主要集中在如何降低半导体材料导热系数的方向上,其主要手段是通过研制纳米结构新材料来增强声子散射降低晶格导热系数。目前半导体热电转换所达到的效率仍然不能满足实际要求。掌握薄膜以及界面能量传递的规律是提高热电转换效率所要解决的关键问题。同时在生物体内,由于大分子及有机分子在热的作用下发生聚合、分解等特殊响应,也将改变微观传热的机制。随着分子成像以及微尺度测量技术的发展,对本部分未知领域的认识也将逐步深入。

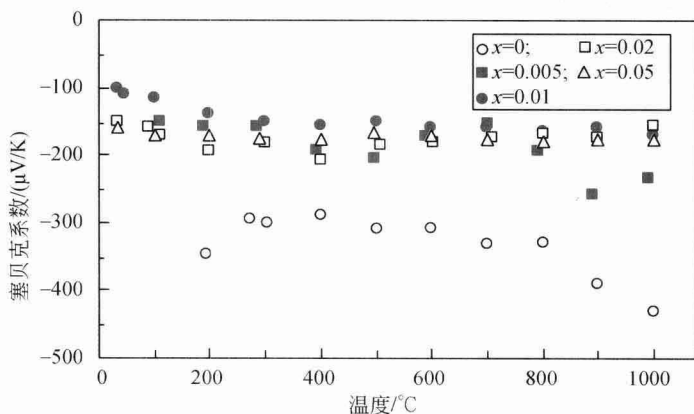


图4.1 $(\text{Zn}_{1-x}\text{Al}_x)\text{O}$ 的塞贝克系数随温度的变化趋势^[3]

2. 非傅里叶效应和耦合问题 (非斐克效应)

在非傅里叶效应研究方面,从事导热研究的人们一直非常关注经典傅里叶理论在面对日益广阔的实际应用和日新月异的高科技发展时所呈现的局限性,试图

探索突破经典理论局限的新科学思维和相关基础理论,除前面所提到的微观乃至量子化新理论外,研究人员主要从快速作用的时间尺度和微纳米化的空间尺度考虑非傅里叶效应,认识、揭示热滞后与波动性影响的导热新现象和新规律,发展基于热质概念等的宏观理论。

在耦合效应研究方面,针对饱和、非饱和含湿多孔介质(包括纳米结构材料)、含电渗及反应溶液多孔材料(燃料电池电极)、冻融土壤、活性组织生物体等复杂特殊导热问题展开研究^[4],尤其是考虑在孔隙尺度上揭示孔隙结构内部现象及松散性骨架与内部现象耦合的导热问题,非常具有挑战性、学术创新性和实用性。除前面提到的用分子动力学模拟等微观方法模拟外,输运物性及导热系数与热扩散系数的测试从常规材料主要转向特殊性介质和材料,如生物组织、溶胶材料、微纳米复合材料、纳米流体等方面。对这些热物理性质和传递规律的描述,正是基于不同过程行为和因素耦合的结果,集中体现在多过程多相的非线性耦合和非均匀性。由于纳米尺度下热量和温度的精确测量极其困难,传统的热物性测量方法和技术很难直接用于纳米尺度下的热物性测量,迫切需要开发能够适用于纳米尺度的热物性测量方法和技术。另外,导热的正反问题求解、边界条件确定、相变导热等其他研究工作也还都在推进,而且有些已与高新科技或现代生产结合,逐渐成为热点。

3. 界面热阻

界面是指两个不同的相如不相溶固-液相以及不互混的气-气相、液-液相、固-固相等之间的理想界面。当热流通过上述界面时将形成温度突跃,我们把产生温度突跃所引起的热阻称为界面热阻。界面热阻与接触热阻是不同的概念。产生界面热阻的原因主要有声子在界面散射、界面材料匹配、晶向分布等。在飞秒/微纳时空尺度下界面热阻所占总热阻的比重增大。目前,人们采用分子动力学和声子动力学开展了界面热阻的一些研究,探讨了声子在界面散射的频率与角度分布特性,界面材料匹配、晶向分布对界面热阻的影响等从而帮助理解界面热阻的物理机制。界面热整流现象及其物理机制的研究是当今国际传热研究的热点前沿课题之一(见图4.2)^[5],具有重要的学术意义和应用价值。但是,有关界面热阻的现有理论研究成果缺乏系统性的实验验证,尤其是界面热整流现象的实验验证鲜见报道。界面热阻的准确测量是目前国际传热研究的一个难题。利用皮秒/飞秒热反射法或拉曼光谱法可望实验测量界面导热特性和界面热阻。

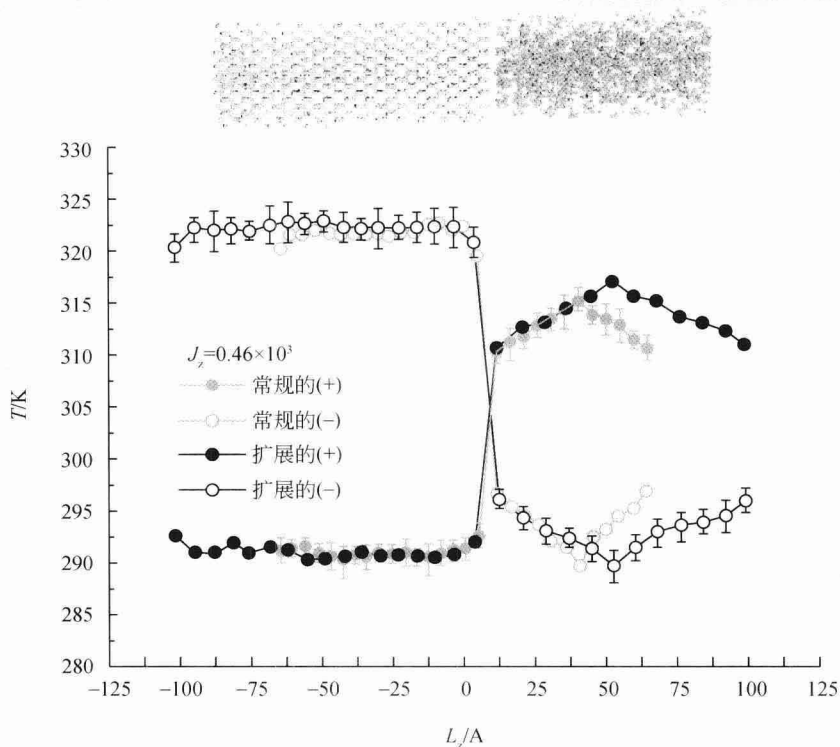


图 4.2 硅聚合物模型的界面结构和 $J_z = \pm 0.46 \times 10^3$ MW/m² 时的温度分布^[5]

4. 接触热阻

两个物体表面在机械载荷作用下相互接触的情况随处可见, 如大规模集成电路芯片冷却、卫星中大热流密度换热器等都是通过接触式换热器完成。当热量流过两个相互接触的固体的交界面时, 接触面两侧将产生温度差, 这是由于在接触面处存在接触热阻所致。产生接触热阻的主要原因是, 任何外表上看来接触良好的两物体, 直接接触的实际面积只是交界面的一部分, 其余部分都是缝隙。在过去二三十年中, 接触热阻一直是传热学中的一个活跃问题, 同时也日渐成为科学研究和工程应用中一个不可忽视的因素。对于它产生的机理, 广大学者进行了大量的理论与实验研究, 普遍认为接触热阻的产生是由于粗糙表面间不完全接触所造成的热流线收缩而导致的。两固体材料接触时, 影响其接触面传热的因素有: 接触面几何形貌、载荷情况、温度条件、材料特性等^[6]。然而热流从两个物体的

接触面通过的行为及其机理迄今还没有被完全了解。近年来,随着电力电子装置飞速向大电流、高功率密度发展,由两个导体通过机械连接方式而实现导电的电接触现象在电力电子装置中广泛存在且不可避免,而电接触界面上由于存在电迁移效应,其传热机理与不通电的固-固接触面完全不同。图4.3是文献[6]给出的纳米纤维的界面接触热阻与交叉面导热系数的关系曲线,温度升高,相同的交界面导热系数下接触热阻下降,且在交界面导热系数较小区域下降明显。

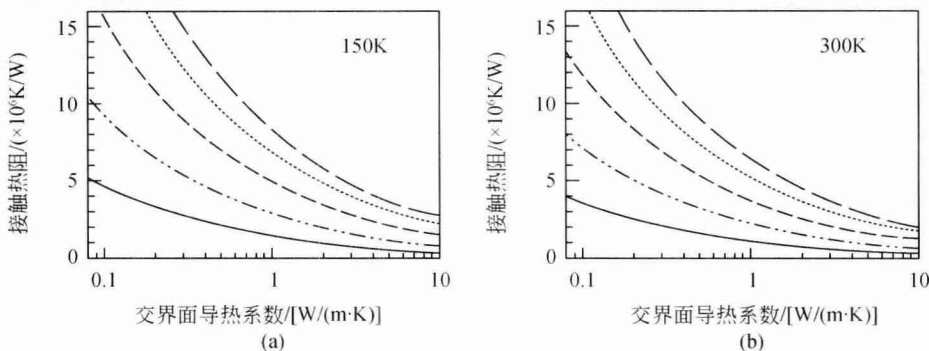


图4.3 纳米纤维的界面接触热阻与交叉面导热系数的关系曲线^[6]

5. 导热与其他传输方式的耦合

信息、能源、环境、国防、生物技术及先进制造等领域的高速发展对极限热特性的功能型、能源型纳米材料的制备及性能提出了全新要求。而对材料进行选择、组装、热设计的有效可控实施,有赖于揭示纳米尺度局部存在和诱发的微细现象、微尺度导热与其他传输方式的耦合、能质传递规律及其对热性能影响的深刻认识,从根本上实现微细观的控制,使新材料、新技术的潜力得以充分发挥,并挖掘、设计新的功能特性。例如:人们已经开始关注介孔异质复合体、填充异质基元的碳纳米管等新材料的制备、表征,目前对材料性能的研究主要集中于力、光和电性质的认识,而对热物理学性能的了解几乎是空白,对导热机理、电子-声子相互作用及热电耦合输运机制探索远远不够,未能明确材料热物理性能与微细结构、组装效应之间的关联机制^[7]。显然,异相/异质特性会引起填充的纳米异质基元(零维纳米团簇/颗粒、一维纳米线)键合特性或晶格点阵的变化,形成微观局部非均相/非均质,并可引起载热子激发方式等的变化;纳米异质基元的体积效应、表面效应、宏观量子隧道效应等必然涉及声子或电子运动,不同形貌、不同性质纳米异质基元载热子的运动特性及由此引发的各种输运效应极为引人关注;同时,纳米异质基元的表面改性,基材与纳米异质基元复合,有可能引发崭新传

递现象和机制,且其对界面散射和波动性的影响也是非常具有挑战性的。

6. 高新技术中的导热问题

在航天器的热控与热管理、激光医疗器件的加热与温度控制、激光焊接融凝传热特性与加工质量控制、大型钢铁生产急淬冷基础理论与技术、复合材料激光成型与处理的热过程、工艺加热冷却基础与技术等随着现代工业发展起来的微机电、激光加工与材料制备等等高科技应用和产业中,导热依然扮演着越来越重要的角色,在这些行业热量传递的突出特点是与工艺过程相关^[8]。实际上,这些传递过程中实际上不但需要应用导热方面的技术基础和成果,还常常需要将对流传热和辐射传热传递方式耦合起来一起考虑,而且往往还需要考虑微纳尺度效应和微时间效应。围绕着微机电高效运行和安全保障,尤其是微电子、光电子和高能密度激光器件冷却的导热分析与实际应用,无论是工业界、用户,还是科研技术人员都给予极高的重视并进行了大量且富有成效的研究工作,包括复杂几何形状的导热,与对流和辐射的耦合,各元部件、散热块之间的接触热阻,对这些现象的理论认识、分析方法与技术应用都有创新性的发展和进步。

导热反问题在航空航天、冶金铸造、机械、核反应堆、化工、地热能勘探、生物传热、热工测量、土木工程、无损探伤、冷冻储藏等工业研究领域中有广泛的应用背景。导热反问题及其方法是认识自然规律的强有力数理工具,有时甚至是唯一有效的研究手段。导热反问题的非适定性、非线性、计算量大等特点,使得导热反问题的求解比较困难。已有的求解方法,如正则化方法、共轭梯度法、单时间步法等均存在一定缺陷,它们往往不能收敛到全局最优解,并且收敛情况与初始值有关。近年来,一些学者把遗传算法、人工神经网络和蚁群算法等人工智能算法引入导热反问题领域,取得了一些进展。

4.2.3 对流传热与传质

1. 单相对流

单相对流传热在人类生活和生产中普遍存在,它不仅受界面几何形态、边界条件影响,还与流动起因、流体热物性及流态等因素相关。由于对流传热机理自身的复杂性和不确定性,至今单相对流传热经典理论模型还存有诸多经验性和局限性^[9]。近年来,随着社会需求的变化与科学研究的不断深入,单相对流传热所涉及的研究领域越来越广,目前国际上单相对流传热研究相对比较前沿的领域包括:多孔介质内的对流传热[如颗粒随机堆积孔隙内的复杂边界层特性(见图4.4)^[10]、超低渗油藏内的非达西渗流效应^[11]、异性多孔介质内流动的多尺度耦合、多孔介

质湍流理论及超轻泡沫金属传热强化机理等], 高温条件下 (1000°C 以上高温) 的对流传热 (如工质热物性非线性温升特性、流道内瞬态热-力双向强耦合特性等), 外力场作用下的对流传热^[12] [如磁场力、哥氏力和离心力作用下的自然对流耦合 (见图 4.5)], 振荡边界下的对流传热谐振强化 (流动传热谐振机理), 微纳尺度对流传热 (边界滑移特性、气体流动稀薄特性、壁面粗糙度影响等) 及微重力条件下的对流传热, 先进燃气轮机叶片内部冷却技术 (叶片前缘冲击冷却结构的合理布置、复合冷却技术、流-固-热多学科耦合等) 等。对于此类研究领域, 往往会产生诸多新的科学问题, 如多尺度、多驱动力强耦合非线性问题, 瞬态热-力双向耦合问题, 纳米颗粒团聚及气体稀薄性问题等, 这些科学问题无疑是当前能源、环境、机械、材料等学科领域长期的研究热点, 同时这些科学问题对传统单相对流传热经典理论模型及研究方法也提出了诸多新的挑战。

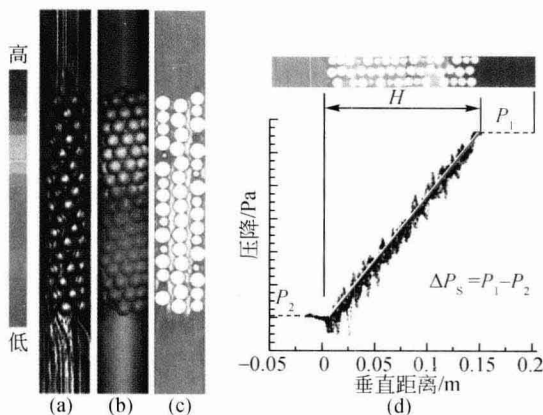


图 4.4 颗粒堆积物内的流动^[10]

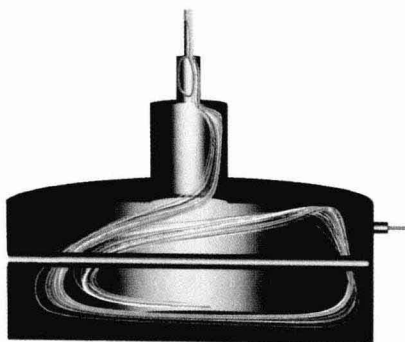


图 4.5 冷却器中超临界 CO_2 自然对流^[12]

2. 相变对流

相变对流以其高热流与小温差等特点和优势, 成为传统工业与航空航天、电子信息、生物医学与新型能源等前沿领域中优选的热质传递过程, 而动力驱动与能量传递的技术发展需要极大地推动了相变对流相关理论基础研究, 特别涉及人工微纳结构、复杂固体表面、工质物性变化、流体双电层、微观聚团性结构、界面热质传递等影响机制。气液相变在微细层面的相过渡与核化、界面传递与驱动流动现象、气泡动力学、非稳态模态特性、气液相变系统内在强非线性作用及其产生的多样性特征等方面的研究呈现出前所未有的新气象, 不断有新现象和新规

律的发现和报道,如云雾状核化、爆发性界面生长与破灭、多样性射流、竞争性核化和界面流动、非平衡性气泡相互作用与运动^[13]等。微小尺度沸腾与凝结的核化受限现象、界面传递尺度效应与微小气泡操控机制,多组分相变传热中温差与浓度差耦合驱动的毛细效应、界面性能调控与动力稳定性,薄液膜与微液滴的动力稳定性、蒸发凝结机理、接触角与界面特性,以及其他方面的研究都非常富有成效和特色。固液相变界面区的团聚溶胶态、晶枝竞争、微细流动等新现象在传热传质中扮演了关键性角色,由此形成固液两相内在的时空非均匀性相互作用。结霜^[14]等气固相变现象和传递规律也有新的发现,蒸汽传递与局部温度场在相变过程影响下产生的非平衡性和非线性相互作用,导致升华和凝华过程的协同发生和强烈竞争关系,展现出丰富多彩的物理图景。

3. 微纳/微细现象

微纳尺度单相对流传热在微电子芯片冷却、生物微流控芯片传输、微能源动力装置热质传递等均有重要应用^[15~17]。随着微纳系统尺度的减小和面体比的增大,各种表面特性(表面亲疏水性、表面粗糙度)及作用力(表面张力、表面静电力等)将更为突出,体积力作用(重力等)将更为削弱,从而导致微纳尺度对流传热出现不同于常规尺度下的现象与特性。各种微尺度效应包括界面亲疏水效应、双电层(EDL)效应、粗糙度效应、形状效应、入口段效应、流固耦合效应等作用已被各种微尺度对流传热实验研究所证实,并由定性揭示过渡到定量描述阶段。与此同时,分子动力学、耗散粒子动力学(DPD)、格子-玻尔兹曼等数值方法被运用到微纳尺度壁面速度滑移及边界温度跃变的模拟研究中,用于揭示气体稀薄效应以及流体与壁面相互作用对微纳尺度对流传热的影响。这些数值模拟方法,包括各种界面作用势的精确描述等都有待深入和完善,从而用于研究微纳尺度对流过程产生的深层次动因和机理。随着微电子集成技术的发展,尤其是三维堆叠芯片技术的出现,如何实施微米尺度对流换热的强化也将是微纳尺度对流传热研究的热点^[18]。电子散热一直以来都是微电子技术发展的“瓶颈”,强化微纳尺度对流传热,从而设计高效电子散热元件是永恒的研究课题。目前微通道强化对流换热研究还主要局限在500 μm 以上当量直径的管道展开,而对200 μm 以下的微米级通道的强化对流换热实验研究还不多见。任何一种数值模拟结果都必须依靠实验验证,因此未来微纳尺度对流传热的突破以及微米水平强化对流换热的实现将更加依赖于微制造技术和微观观测手段的进步与对各种影响因素的精确揭示和描述。

随着尺度减小,微纳尺度相变对流换热也会呈现一些不同于常规尺度的独特特性^[19]。由于重力作用可被忽略,微纳系统中不会出现常规尺度相变中因重力作用而导致的分层流等现象。与此同时,微纳尺度中还会出现一些新的独特相变流型。

有研究发现：在微通道凝结流型演变过程中，由于表面张力的主导作用，在环状流向塞泡状流的过渡中会出现一种奇特的周期性喷射流现象，并导致凝结传热规律的变化。微尺度沸腾相变^[20]也表现出诸多特点（见图4.6）：由于通道径向尺寸的限制，微尺度沸腾中同一截面上多出现单个汽泡，而非常规大尺度通道中常见的多汽泡簇，且微尺度沸腾相变极其易诱发汽相倒流，以及大幅度温度和压力振荡等非稳定现象。此外，表面亲疏水特性、粗糙度等特性对微尺度相变对流换热影响也十分突出。已有研究发现对受热亲水性微纳通道，微汽泡易产生在通道中央，而对疏水性微纳通道，微汽泡易产生在通道壁面。目前微纳尺度相变传热研究尚待深入的工作包括：微纳尺度沸腾和凝结两相流型图的绘制，沸腾和凝结传热及阻力准则关联式的建立，不同条件下沸腾临界热流密度的确定，以及微通道中沸腾非稳定性所导致大幅度温度和压力振荡的控制等。与此同时，为更好理解微纳尺度相变传热机制，微纳尺度沸腾和凝结相变传热数值模拟方面的研究也有待突破。

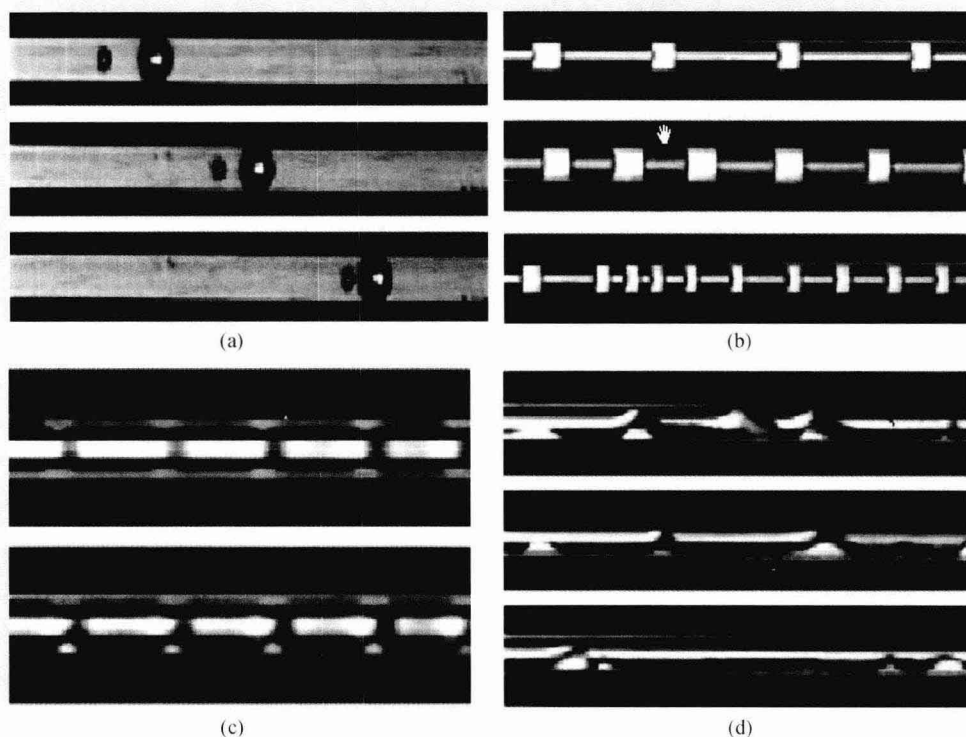


图4.6 微通道内的沸腾换热两相流型^[20]

微重力条件下的对流换热也是一个重要研究方向^[21],它对微重力下对流机理的揭示以及太空环境下热管理系统的设计都有重要意义。微重力条件下,表面张力、润湿性、表面粗糙度等物体表面特性及作用力占主导地位,重力作用所产生的热对流相对常规重力条件下显著下降。液体的表面张力受温度、溶质、电位势等多种因素的影响较大,这使微重力下流体流动及相变传热过程变得极为复杂。在微重力环境中,许多在地面上的次级效应以及相变对流中与自由面或界面有关的现象将变得很重要,会出现一些在地面上尚未见到的新现象。自由面上温度或浓度分布不均匀形成的表面张力驱动产生 Person 对流和热毛细对流,高温差可使对流产生振荡作用。在微重力相变传热过程中,由于重力作用的极大减弱,气泡和液滴的动力学特征也与常规重力下也有本质的不同。研究表明,微重力下两相流型与微纳尺度下的两相流型具有很强的相似性,这是由于二者存在均由表面力占主导地位这一共性所引起的。常规的基于强化温度差引起的密度差所产生的对流强化传热方法,在微重力条件下很难奏效。借助电磁力、离心力等外力作用成为主要的微重力强化传热手段。无源条件下,温度差及浓度差引起的 Marangoni 效应的强化是主要手段。目前对微重力条件下的热毛细对流以及 Marangoni 对流已经进行了大量的研究。对微重力条件下的自由面振荡对流的机理有了深入的理论和实验研究。对于微重力下气液两相流的对流传热研究则主要集中在微细过程的观察和微观机制的探索。在微重力沸腾传热方面,主要是通过对气泡的产生及消亡过程、气泡分布以及气泡周围液体的微对流结构等微细行为的实验观察,结合微重力条件下的沸腾传热特性数值模拟来进行,这些研究有助于我们对微重力相变对流传热机理的认识和理解。然而,热毛细对流、浓度毛细对流和相变对流之间的耦合依旧是微重力对流换热领域的一大难题,微重力条件下的复杂流体对流传热也是需要关注的科学问题。

4. 多场与耦合驱动

经典的自然对流和受迫对流传热范畴近年似有很大改变,从复杂几何流动情况转向综合多场耦合、多驱动的流动与对流传热,包括针对极端条件限制和特殊场合下的新问题,此时相对常规情况的微弱因素会得到强化、甚至主导化,因而所引起新的传热机理。微重力对流传热,特别是相变和与界面驱动有关微重力传热已取得非常有意义的进展,揭示出诸多界面流动、相变与气泡动力学特性和传热新机理新规律^[22]。结合动力机械、微电子技术、航空航天等进行的各种力,诸如电磁场力、哥氏力、毛细力、离心力等综合作用下的对流传热研究,无论国内国外都相当普遍,正逐渐深入,提供了大批第一手实验数据资料和理论结论。电磁场作用下的液态金属流体自然对流及受迫对流传热是磁约束热核聚变反应堆

的关键科学问题,是液态包层研发的核心科学问题之一,也是电磁冶金的重要科学问题。在理论分析、实验、模拟等方面已取得有意义的进展,国内在相关领域有较好的基础。精确的实验手段及高效精确的数值方法需要进一步发展,磁流体力学效应下的压力降、射流及流动的失稳与湍流对传热及传质影响机理的研究需要进一步深化。极端条件(极大热流密度及强磁场)作用下的多相传热与传质,是亟待解决的重要科学问题。

微弱的电渗、离子扩散、反应势差、界面能、离子与电荷驱动、具有自恢复和再生生物化学活性等等因素,因尺度和特殊环境条件变得十分重要,甚至起主导作用,像燃料电池堆、活性吸附剂、生物组织与生物多孔材料等,它们驱动的流动、传热和传质具有完全不同的规律和基础理论意义。脉冲震荡、冲击射流、交叉混合流动、纳米流体、相变纳米流体、超临界流动、稀疏黏稠多相混合流动、高温高速稀薄流动等复杂对流传热,其他各类单相对流换热都在蓬勃发展。这些也是对流传热研究变化最大、最快、最富挑战和创新性的前沿。

5. 质量传递中的机理问题

传热传质虽然经常伴生出现,但传热无论从内容的丰富性还是研究的深入性比传质高出许多^[23]。随着近年来环境问题、健康问题日益受到关注,传质研究的重要性日益凸现,其机理上的不完善也被逐渐认识。传质作为浓度差导致的现象,普遍存在于我们的日常生活中,如室内污染物的扩散等。目前大多室内材料都为人工复合材料,其中有大量化学材料会释放对人体有害的物质,如有机挥发物(VOC)、半有机挥发物(SVOC),人体长期暴露于这些污染物中会引发健康问题,甚至致癌。美国把室内空气污染列为引起健康危害的重要原因之一。

1) 复杂多孔介质中的介观和微观传质特性

无论是室内材料还是人体,很多都是复杂多孔介质。室内材料中污染物的释放规律、室内环境污染物的控制和净化,以及污染物在人体中的传质和健康影响机理无一不涉及复杂多孔介质传质。20世纪90年代以来以美国为代表的发达国家特别关注有机挥发物和颗粒污染对人体造成的健康危害,对相关的机理问题开展了深入研究,我国室内空气污染问题远比发达国家严重,添加剂引发的食品安全问题也日趋严重,一些新材料如塑料添加剂、阻燃剂等释放的半有机挥发物的健康危害近年来也逐渐引起人们的关注^[24]。但这些污染物的散发特性、规律、相关物性参数及其在人体中的迁移和人体细胞作用致病原理尚不清晰,其中很多问题需从介观、甚至微观角度(如分子生物学角度)进行研究。图4.7是文献[24]给出的建筑物壁面污染物颗粒穿透系数与粒子直径、裂缝高度和压差的关系。

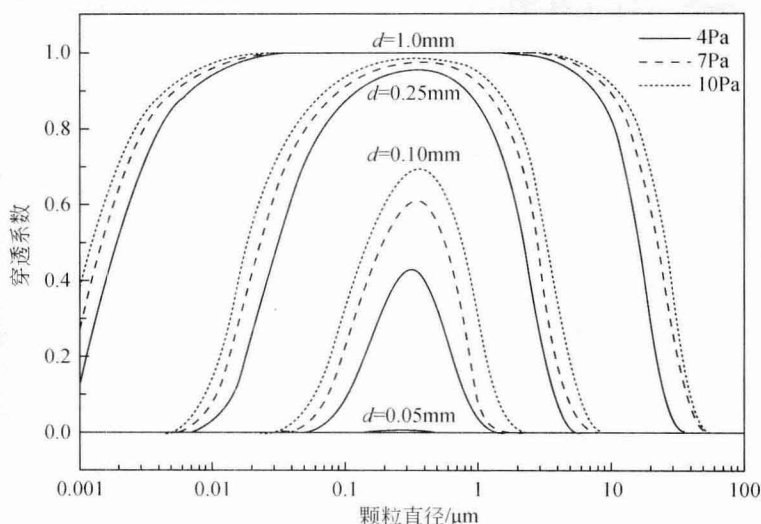


图 4.7 建筑物壁面污染物颗粒穿透系数与粒子直径、裂缝高度和压差的关系^[24]

2) 复杂条件下多组分吸附和催化反应机理

室内空气质量控制离不开源头控制和空气净化材料,而无论是源头控制还是空气净化,高性能材料及其性能优化是关键,空气中的污染物有很多种,其在不同环境条件(如温度、湿度)下的竞争吸附和催化反应机理需深入探讨。

3) 传热传质耦合

建筑环境的传热传质问题往往是热质耦合问题。传热与传质的互相影响机理以及综合优化控制原理需深入探讨。热量传输和质量传输同时进行,将产生交互扩散效应即 Soret 效应与 Dufour 效应,特别在温度差和浓度差较大、或者多组分混合物分子量相差较大时,则应考虑这种耦合扩散效应,目前在水汽质量传输与热能传递的互相作用、多孔体系内吸附反应与传热传质的交互耦合扩散作用^[25]等理论模型方面取得一定的研究进展,但这种非平衡耦合传递的微尺度和高精度实验测试原理与方法有待进一步探索。

6. 高新技术中的对流问题

随着高新技术和科学的发展,对流传热问题在许多新兴技术领域起到非常重要甚至关键作用,如新能源、微电子、核能、航空航天、微机电系统、新材料、纳米技术、军事科学与技术、生命科学与生物技术等领域^[26]。这些高新应用,使得对流问题面临着几大难题:尺度微小化、作用物理场的复杂化和多样化,以

及运行环境的极端化等,所有这些难题使得经典的对流和传热理论面临着巨大挑战,有待进一步深究和探索。

在流动尺度微小化方面,涉及的领域非常广泛,如在微电子、MEMS(如微型马达、微型传感器、微机械陀螺、微型泵、阀、微型火箭等)、生物医学工程(心脏泵、血液泵、微传感器等)及其生物信息与控制(如生物芯片等)都涉及微尺度对流问题。尺度的微小化引起了通道内部流动的特殊性:一方面,微尺度器件中大的比表面积使得与面积有关的一些参数相对于常规尺度更加突显,如壁面粗糙度、几何结构、毛细作用等;另一方面,尺度的微小化使得界面和边界区微细流动、相变界面作用变得更加强烈;同时,尺度微小化也使得基于连续性假设的经典流动理论可能不再适用,对理论预测和描述提出了新的要求。

在复杂多物理场作用下,流体流动存在多种复杂驱动力及其非线性耦合作用,使得流动问题呈现复杂性、多样性和非线性等。例如,在新型能量转换装置——质子交换膜燃料电池中^[27],流体在压力梯度、浓度梯度、温度梯度以及电渗等多种复杂驱动力作用下,在微小通道以及各种复杂多孔结构中扩散、流动和传热,使得这一物理问题变得极其复杂,而燃料电池内部流体(水)的分布和移除,极大影响其运行性能。对于质子交换膜燃料电池内部流体在复杂多物理场驱动下的流动和传输问题的深入认识,不仅依赖于多孔介质内多相传输理论的突破,还依赖于对燃料电池内部微观结构和传输过程等的深入探析。

一些极端和复杂条件下的流动问题,如在航空航天领域经常会面临的微重力环境,能够有效地抑制重力作用所带来的一系列复杂物理现象和过程,对于认识流动本质、揭示流动规律有着重要的价值,对地面应用技术也有重要的指导意义。另外,随着芯片集成度的飞速增加,芯片单位体积内产生的热量急剧上升,已达几十至几百千瓦的热量,芯片上的热流密度高达 10^7 W/m^2 量级,在极端热流密度条件下,芯片散热和冷却问题面临巨大挑战。采用液体相变、微通道热沉和喷淋冷却技术等方式是解决问题的可能途径,相应的冷却器件内部流体的对流、相变以及湍流模式的探讨,变得至关重要。

对流与传热问题是能量与动力领域最基本、最经典的问题,而在高新领域的各种应用中对这一问题提出了新的要求,尺度微小化、物理场复杂化以及工作环境的极端化,对经典流动和传热理论提出挑战,不但涉及学科、工业技术背景和行业等全方位的交叉,就本学科的研究而言也都是非常前瞻和热门的方向,成为理论技术成果和进展很集中的领域。

7. 高速飞行条件下的流固耦合

超声速巡航飞机、导弹、高超声速飞行器以及可重复使用天地往返运输载具

等各种类型的高速和高超声速飞行器技术不仅具有重大的国防价值和社会经济意义,而且反映一个国家的科技水平和能力,是航空航天领域的重点发展方向。

流固耦合传热是高速飞行器的热防护、红外探测、红外隐身等关键技术中的共性基础科学问题,涉及真实气体高速气动对流、非均质各向异性导热、介质热辐射、表面热化学反应及热质传递效应、表面细观传热的多层次复杂耦合作用。开展高速飞行条件下的流固耦合过程基础研究(见图4.8)^[28],认识流固耦合瞬态过程中各种效应的复杂耦合机制、作用途径和特性规律对相关技术的创新发展非常重要。目前,国际学术界对超声速和高超声速气动热、热防护材料与结构传热机理、燃气轮机叶片冷却等内流亚音速流固耦合问题已比较重视。由于问题的复杂性,对超声速和高超声速流与复杂固体结构的流固耦合问题研究尚比较缺乏。

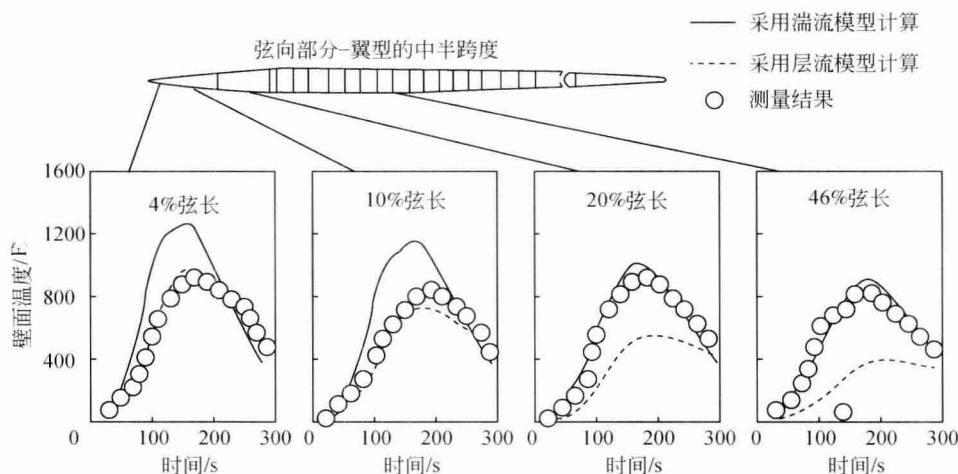


图4.8 X-15型飞机机翼瞬态温度分布曲线^[28]

高速飞行条件下的流固耦合传热研究的主要科学问题包括:多物理场耦合机理及其表征和描述方法、高精度与高效计算方法、地面模拟试验方法、温度/热流与压力测量方法、瞬态热过程时频特性、界面细观传热机理、多尺度分析方法、材料体系热化学反应及热质传递效应、热辐射效应及红外光谱特性等。

4.2.4 辐射传热

1. 辐射热力学基础

用热力学分析的方法来研究能量转换设备,如太阳能吸收器、锅炉和燃气轮

机内部的传热过程是当今的一个研究趋势。热力学分析可提供设备和器件性能的理想界限指标,并对器件性能进行合理的评价,同时指明设备改进的方向。由于热(光)辐射是太阳能吸收器、太阳能电池、热光伏器件内的主要能量传递方式,故在用热力学第二定律对这些能量转换装置进行分析时,辐射熵产的正确计算非常重要。

在宏观尺度框架内,Planck 从不可逆性的角度研究了光和物质的交互作用,并给出了非相干条件下的光谱熵的表达式。Wildt 首次用公式表述了辐射熵传递方程,并基于宏观考虑推导了辐射熵的一系列不等式。Kroll 分析和讨论了熵产的一般形式及其时间导数,结果表明由发射、吸收、散射过程产生的熵产在一般热力学流与力的关系上是双线型的。Wright 等^[29]研究了灰体壁面的辐射熵产,给出了灰体辐射熵的近似表达式。Caldas 等^[30]研究了半透明介质中辐射熵产,并给出了相应的数值模拟方法。

熵产与热力学的不可逆性有关,不可逆性存在于所有的传热过程中并且导致有用功损失。导热过程局部熵产率计算公式为

$$S_{\text{gen}}^c(\mathbf{r}) = -\mathbf{q}^c(\mathbf{r}) \frac{\nabla T_M(\mathbf{r})}{T_M^2(\mathbf{r})}$$

在传热学领域,仿照上式,传统的辐射换热过程局部熵产率计算公式常写为

$$S_{\text{gen}}^r(\mathbf{r}) = -\mathbf{q}^r(\mathbf{r}) \frac{\nabla T_M(\mathbf{r})}{T_M^2(\mathbf{r})}$$

式中, \mathbf{q}^r 为辐射热流密度矢量。从上述两公式来看,似乎导热和辐射过程具有相同的热力学力,因而辐射与导热复合换热过程局部熵产率可按下式计算:

$$S_{\text{gen}}(\mathbf{r}) = -[\mathbf{q}^c(\mathbf{r}) + \mathbf{q}^r(\mathbf{r})] \frac{\nabla T_M(\mathbf{r})}{T_M^2(\mathbf{r})}$$

导热和辐射是两种不同机制的传热过程。导热和辐射的显著区别是它们对温度的依赖不同。根据傅里叶定律,导热热流密度与当地的温度梯度成线性的比例关系。然而,半透明介质中热辐射通常是一长程的现象,辐射热流密度取决于所考虑的整个封闭体内的温度分布,而不是由该处的温度梯度所决定,因而传统的辐射局部熵产率计算公式的有效性值得质疑。文献[31]~[33]通过举反例的方式指出了热工学界传统局部辐射熵产公式的错误,并在非相干辐射假设条件下,基于普朗克(Planck)辐射熵强度定义,导出了宏观尺度框架内辐射熵和辐射能可用功的传输方程,给出了辐射熵产的计算公式,同时证明了公式的正确性。

在微纳尺度条件下,几何光学已不再适用,且光波间往往存在不同程度的相干性,导致系统热力学几率减小,导致系统统计熵变化。当光辐射波长小于或等于相干波长时(相干波长与薄膜性质、光源和探测器的特征有关),波的干涉变

得非常重要。此时,普朗克辐射熵强度的定义已不再成立^[34],必须从光子微观状态和相干状态的表征出发,按统计热力学的角度对光辐射熵进行定义。正是由于这一原因,目前不同学者对微纳米结构和器件热力学性能评估所得结果还存在很大差异,甚至相矛盾。光子的传递过程往往与电子和声子的输运相关联。因此,在微纳尺度条件下,需利用量子光学和波动光学的理论,在对辐射光量子微观状态深入分析和甄别的基础上对辐射热力学参数进行重新定义,并将光子辐射熵的概念推广到声子和电子输运过程,以实现太阳能电池、热光伏器件进行正确的热力学分析、优化和性能评估。

2. 近场辐射

1) 微尺度辐射换热的工程分析理论

近10余年来,随着现代高新技术的发展,特别是微电子、微机械、激光和光电子系统的发展,微纳尺度传热现象引起了广泛的研究兴趣。在辐射传热方面,已通过实验发现了一些重要的新现象:随着接触面距离的靠近,特别是距离近至壁面波长量级(即近场)时,辐射换热可以突破普朗克经典热辐射理论预测的极限换热量,达到极大的热辐射能量密度。现有研究表明当两个辐射源之间距离从常规尺度减小到纳米量级时,辐射换热量会比斯特藩-玻尔兹曼(Stefan-Boltzmann)公式的计算结果增大5~6个量级。当两个物体间的距离远小于热辐射特征波长时,波的干涉效应以及光子隧道效应在该尺度下作用尤其显著。微纳尺度下辐射传热研究^[35]的重要性体现在一系列高新技术背景中,如光电探测器、光电转换设备、光学薄膜、光子晶体器件、超短脉冲激光材料加工等。目前,微纳尺度辐射传递已成为热辐射研究的前沿课题。

随着研究尺度小到微纳尺寸,传统传热理论在宏观条件下的一些假设条件的普遍适用性、可用性受到广泛质疑。传统的辐射传输理论建立在几何光学假设的基础上,并依赖于以下三大基本假设:①物体的空间尺度远大于辐射的峰值波长;②物体间热辐射传播所需的时间远大于物体分子热激发的弛豫时间;③辐射能与热能之间的转化是瞬间完成的。然而,在微纳尺度,由于几何尺寸接近甚至小于热辐射峰值波长的尺寸,这些假设已不符合辐射传输的实际情况。传统辐射换热的工程分析理论处理近场辐射换热已经失效,这要求对于近场辐射换热的工程分析建立新的理论体系。

2) 基于微结构的表观光谱辐射特性调制

热辐射光谱控制是热辐射领域一个重要的研究方向,在亚波长尺度分辨率显微镜、热电探测、热光电转换等技术领域有着重要的应用背景。通常意义上,热辐射具有波谱连续、准各向同性的特点,不具有相干性。然而,文献[36]在

对由极性材料制成的 SiC 微结构光栅的热辐射特性进行研究时发现,热辐射呈现明显的干涉特征,并用表面波的激励对此进行了解释。在宏观尺度下热辐射不容易发生干涉现象,但是随着系统尺寸的减小,干涉变得容易发生。

随着微纳米技术的迅速发展,人们可以通过微纳米加工技术构造亚波长人工微结构材料。周期性阵列的微观散射和介质格子的布喇格散射会强烈改变光的色散关系,因而传播的电磁波受到周期性调制而形成光子带隙。如果光子频率落入光子禁带频率范围内,则不能在介质中传播。利用光子晶体理论上可在不同方向上对热辐射光谱进行控制。

利用微结构体系实现热辐射和电磁辐射的控制和修正,学术界在理论和实验方面做了大量卓有成效的研究工作。一维光子晶体可以明显抑制光子带隙范围内特定频段的热辐射,却可以显著增强带隙外的热辐射。文献[37]证明多层平面的一维光子晶体结构对于红外波段内两种偏振的电磁波都表现出极高的时空相干性。二维光子晶体可以被用来增强特定频段的热辐射本领。文献[38]提出二维光子晶体微腔结构具有相干热辐射,影响辐射频率和传输方向的主要因素是晶格结构参数。三维光子晶体具有完全带隙从而可以产生更宽的电磁禁带。文献[39]证明了三维光子晶体的相干热辐射特性,热辐射本领在带隙边缘可以得到明显增强,带隙边缘光子态密度的增强意味着可以增加热辐射的相干长度。

3) 电磁超介质——左手材料的热辐射特性

近年来,通过控制构成单元及其尺寸,人为设计的具有特殊性质的金属基复合材料在微波频段实现了自然界不可能实现的负折射,使得人工微结构异向介质(左手材料,负折射介质等)的研究迅速发展起来。这种金属光子晶体不仅在微波频段能够极大地降低损耗实现全带隙,在光频段还可以实现全角负折射。因而,通过设计微结构材料的结构控制相关频段电磁场的性质成为人们研究的目标。2000年美国加州大学的 Smith 等在实验上制成了第一个在微波段具有负的介电系数和磁导率的人工金属材料。文献[40]发现负折射率材料平板是一种具有放大隐失波功能的完美透镜,对于薄金属板,由于表面等离子体的增强效应也会出现隐失波的放大效应,以至于成像的分辨率可以突破波长的衍射极限。文献[41]研究发现负折射率材料能极大地增强光子隧道效应。相关研究证明对于负介电函数和负磁导率介质结合的平面结构,通过调节介质层厚度可以控制辐射频率和传输方向。从已有实验工作和结构分析的角度来说,电磁场在异向介质中的传播特性强烈地依赖于材料的固有性质以及结构单元的尺寸、形状、均匀性、对称性等。含异向介质的光子晶体比传统光子晶体具有更宽的带隙和更狭窄的透射带,可以用于设计多通道光子晶体滤波器。含异向介质的光子晶体的热辐射光谱控制特性国内尚未见报道,对于左手材料复杂的电磁特性在热辐射能量交换中的作用也未进行考虑。

3. 远场辐射

1) 高温介质与及弥散系统的非平衡辐射特性

随着先进推进技术、战略防御技术、等离子体技术和光谱诊断等技术的发展^[42], 高温等离子体微观能量输运机制及其辐射特性、高温粒子及团聚物辐射的微观机制和规律的研究是国际上的一个热点问题。

物质处于高温等离子体状态下时, 电子不仅在原子核束缚状态下形成束缚-束缚跃迁, 还会发生束缚-自由跃迁, 挣脱原子核的约束, 形成大量自由电子。此时, 由束缚-自由跃迁导致的光致电离或辐射消电离, 以及由自由-自由跃迁导致的韧致辐射成为等离子体内部最典型的辐射发射和吸收过程, 直接影响到等离子体局部辐射特性。此外, 在超强、超短激光脉冲的作用下, 微观粒子的运动特性甚至可能受投射辐射的影响。由此可见, 等离子体状态下物质的辐射特性与辐射传输过程、物质输运过程复杂耦合, 不能割舍它们之间的内在联系简单研究等离子体的辐射特性。

所谓非平衡, 即指在研究的局部区域内, 各种形式的能量分布和热力学特性不能由统一的温度来描述。极高温多组元气体非平衡辐射常伴随一些极端过程出现, 如高超声速飞行、等离子体加热与驱动、激光与物质相互作用、核爆炸等^[43,44]。在高温 (3000K 以上)、高焔、高速等极端条件下, 气体组元产生离解、复合、电离、内能级激发跃迁等多种形式的物理化学过程, 不同的过程有不同的特征弛豫时间, 导致高温气体内分子、原子及离子等各种微观粒子的能级数密度分布偏离经典的玻尔兹曼分布, 并最终导致辐射特性不再满足由单一温度控制的基尔霍夫定律和普朗克函数关系。

正是因为极端工况下多种弛豫过程的存在, 致使非平衡状态成为较平衡状态更为普遍的状态。而高温非平衡条件下, 气体辐射往往是主要的加热方式, 如飞行器高速进入土星大气的实验表明, 激波层辐射是主要的加热方式, 是对流加热的 7 倍; 研究还表明火星探测器再入时辐射热流峰值是气动热流的 10 倍。非平衡效应的存在将使辐射能力提高 2 ~ 15 倍, 而考虑和不考虑非平衡效应的辐射理论计算结果甚至可以相差 1 ~ 2 个数量级以上, 如对探测器进入金星大气层的研究表明, 考虑非平衡化学过程的非平衡辐射加热近似为平衡时的 2 倍。

自 20 世纪 60 年代阿波罗计划开始, 以美国 NASA 为首的研究机构整合了热辐射、分子动力学、化学动力学、光谱学、计算物理等多个学科的科研实力, 针对高温非平衡气体辐射特性开展了系统研究。至今, 高温非平衡气体辐射特性仍是航空航天高技术领域的研究热点。我国在该领域的研究起步较晚, 尚未形成独立的研究体系, 亟须从微观物理化学过程入手, 建立微观过程基本物性参数数据

库, 细致研究各种非平衡弛豫过程, 探寻高温非平衡态多组元气体辐射的微观机制和规律, 建立气体宏观非平衡辐射特性与微观弛豫过程间的统计关系。

从微观角度看, 辐射与等离子体的耦合过程可以看做光子输运与分子输运的耦合过程, 二者统一于玻尔兹曼方程。从碰撞理论出发, 在玻尔兹曼方程框架下研究高温等离子体内能级激发、离解、电离、复合等微观能量输运机制, 获得高温等离子体能级布居模型; 基于量子力学、光谱学和原子分子辐射理论发展高温等离子体辐射特性参数计算方法; 在此基础上, 发展基于玻尔兹曼方程框架下的高温等离子体辐射特性和辐射传输研究方法, 并探寻其规律; 开展激光等离子体实验观测, 进行理论模型校验和非平衡机制分析。

2) 非均匀弥散颗粒团簇多尺度辐射

弥散颗粒广泛存在于化工、冶金、动力、建筑、医药、生物、食品、航天、气象、大气等多个应用领域, 粒子问题的研究涉及传热学、天体物理学、地球物理学、光学、电磁学、微观物理学、生物学、胶体化学、声学、军事科学等多个学科。目前, 随机团聚状态下多组分、非球形和非均匀弥散颗粒团簇辐射特性的研究成为国际学者研究的热点, 已成为火焰燃烧诊断、航空航天、大气遥感探测等技术领域所关心的基础科学问题^[45,46]。

在自然环境中, 很多粒子都是呈聚集粒子状态存在的, 如大气中的悬浮颗粒、气溶胶微粒、星际间的尘埃等, 均可以看做由大量基本球形粒子因无规则运动群聚而成的聚集粒子。在高温燃烧系统中, 超细的基本粒子会聚集成形状、大小各异的聚集团簇。以炭黑火焰为例, 炭黑微粒子(10nm 量级)集中于火焰面以内聚集成非规则结构的团聚物, 其辐射特性是在炉内辐射换热计算过程和炉内的火焰温度的光学诊断中必不可少的参数, 聚集体结构和形态变化直接影响到粒子辐射特性, 对聚集体辐射特性的研究对进一步精确模拟炉内辐射换热和光学诊断火焰温度具有重要意义。由于炭黑团聚粒子的复杂结构, 研究其光学和辐射特性具有一定的困难。目前的结论是聚集效应使前向散射增强, 但是对聚集粒子相函数的具体形状特征还不准确, 有待于进一步研究。炭黑粒子常常是与其他非吸收介质内部或外部掺混。高温的炭黑粒子容易被非吸收性介质壳所包围形成内部混合形式, 如链状非均匀内混结构。这些链状结构聚集体相互作用而折叠起来形成紧堆类球形结构, 这些链状非规则聚集粒子具有分形特性且具有特殊的光学特性, 采用球形等效均匀假设将导致不真实的辐射特性。由于炭黑粒子对光的吸收和散射能够被混合物所改变, 炭黑和灰尘混合的团聚物散射研究受到关注。掺杂灰尘粒子的体积分数、内部掺杂结构和粒径分布对炭黑团聚物的吸收和散射特性的影响需要进一步研究。

3) “黑障”状态下热质传输研究

高超声速飞行器在穿过大气层时, 与空气产生巨大的摩擦和强大的挤压, 形

成高温激波层, 气体分子在激波层内被电离, 产生自由电子; 此外, 飞行器壁面烧蚀增大了激波层内电子密度, 最终导致在飞行器周围形成高密度、低温度等离子体层, 称之为“等离子鞘套”^[47]。因“等离子鞘套”内电子密度极高, 出现“黑障”现象, 此时射频通信信号强烈起伏和衰减, 并可能产生信号中断, 直接影响地面测控设备对目标信号的跟踪和测量。在此期间, 目标通常经历最为恶劣的环境, 此时的最大冲击、振动、过载、热流等参数急需传送至地面, 进行实时分析和事后处理。哥伦比亚号航天飞机因“黑障”导致事故前遥感勘测失灵, 几乎没有地面数据可以支持对事故的分析; 无人火星探测器在再入过程中, 因“黑障”导致飞行器失去控制中心的控制和导航, 此时, 连续和实时的遥感是飞行任务是否成功的关键。

在“黑障”状态下, 有如下热质传输相关科学问题有待开展研究: 高超声速飞行器再入飞行弹道的精确确定是攻角估计、气动参数辨识等气动设计、分析工作的前提, 在“黑障”导致无线电通讯中断的环境下, 等离子鞘套的辐射特性成为重要的辅助手段; 光致电离是激波层内电子产生的主要机理, 采用敏感性分析的方法, 耦合光化学和辐射传输过程, 系统研究飞行器飞行环境、速度、壁面外形及材料等因素对等离子体鞘套形成过程的影响, 探寻减轻“黑障”的手段; 耦合分子输运、离子输运、光子输运和碰撞反应机理, 系统分析等离子体鞘套内的传热传质过程, 准确计算等离子体鞘套内的对流和辐射热通量。

4. 高新技术中的热辐射问题

1) 极端条件下固态物质热辐射参数的估算方法

材料的热辐射特性参数是进行辐射计算和分析的前提。在工程应用和科学研究中, 高精度的红外辐射模拟分析常常面临与之相关的超高温和超低温等极端条件下材料辐射热物性数据缺乏的问题。迫切需要极极端条件下固态物质的基本热辐射参数从更高层次和深度来分析研究。

超高温和超低温等极端条件下固态物质的基本热辐射参数的实验测量, 所需设备复杂、实验困难, 且难以获得波长连续的数据。目前, 文献中公开的高温热辐射参数数据十分奇缺, 严重地限制了极端条件下红外热辐射的模拟精度。

热辐射过程涉及材料分子和原子内部微观能级的跃迁。研究物质的微观结构、宏观辐射特性以及两者间的联系是材料热辐射特性研究中的重要课题。原则上利用材料的分子和原子结构参数, 求解薛定谔方程得到系统的波函数后, 系统的全部物理性质都可以由波函数导出。随着计算机技术的迅猛发展, 计算机模拟已成为辐射热物性研究的重要手段。深入研究材料微观结构与宏观热辐射参数间的理论关系, 发展极端条件下固体物质热辐射物性参数数值预测的第一性原理方法, 是热辐射研

究的一个重要基础方向,也是国际上本领域尚未开展的前沿课题^[48]。

2) 复杂红外辐射特征提取和融合

红外辐射作为热能和信号传递的一种方式,在军事目标的红外探测、识别、跟踪、制导和红外隐身等国防安全技术领域有广泛的应用^[49]。捕捉目标的距离除了与红外成像、红外跟踪系统的灵敏度直接有关外,也与目标及背景的红外信号特征及大气穿透率有着密切的关系。自20世纪60年代以来,国外军事强国先后进行了高空环境模拟器模拟测量,发动机尾喷焰红外光谱分布随高度变化的外场测试,弹载的导弹尾喷焰和地球大气背景红外光谱测量,星载的地球、大气背景红外测量。为支撑能预警战略、战术导弹发射的新一代导弹预警卫星的研制,近几年来,国外有关飞行器喷焰、尾流的热辐射传递和特性的研究不断深入,理论模型和计算方法仍在不断地改进与完善^[50]。作为适应未来高科技战争的需要,提高防御和预警能力的基础和理论储备,开展目标光谱辐射特性研究具有迫切性,尤其是在复杂环境和条件下红外辐射特征提取和融合的理论与方法。

3) 多孔复合材料的热辐射特性及多模式耦合换热

多孔复合材料是一类新型的多功能材料(见图4.9),一般指由一定元胞微结构构成的高孔隙率的特殊新型复合材料^[51]。目前国际上已展开研究的多孔复合材料主要有泡沫陶瓷和泡沫金属^[52],其他还有聚酯泡沫、气凝胶等。多孔复合材料的孔隙率范围一般在40%~98%。由于多孔隙及特殊的微元胞结构,多孔复合材料除具有母体材料的基本特性外,还具有质量轻、刚性强、吸能性能优异等特性,因而在航空、航天领域有重大的潜在应用价值。由于泡沫陶瓷和泡沫金属适用于高温换热过程,多孔复合材料的辐射特性预测及多模式的耦合换热成为辐射换热领域的一个重要研究方向。

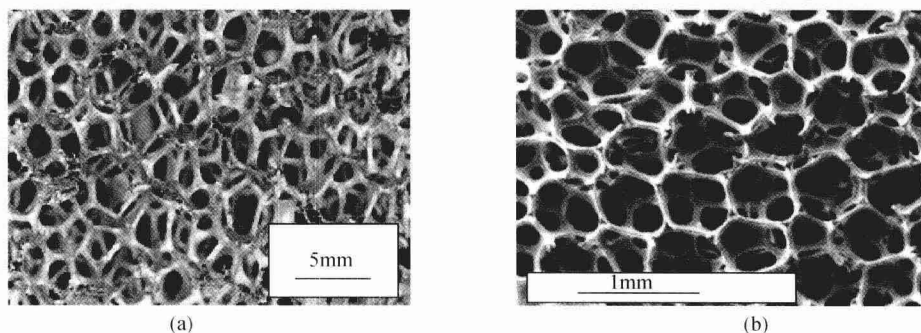


图4.9 多孔复合材料

目前国内外对多孔复合材料内辐射换热的研究刚刚开始。由于具有复杂的多孔结构,通过对孔隙结构进行详细建模和网格离散,直接求解孔隙尺度的辐射传递方程工作量巨大,显然不适合工程设计的需求。建立多孔复合材料连续介质近似下的辐射传输模型然后进行求解是一种思路。基于连续介质近似,多孔复合材料内热辐射传输预测的关键问题和困难在于等效辐射特性如吸收系数、散射系数、散射相函数等基本参数的确定。

5. 计算热辐射学

描述辐射能传输过程的基本方程为辐射传递方程^[53]。由于辐射传递问题的复杂性,理论分析仅限于对极少数简单的问题,多数情况下只能通过数值计算的途径进行近似求解。目前已发展起来的辐射传递方程数值求解方法主要可以分为以下两类:①基于射线跟踪的方法;②基于微分形式辐射传递方程全局离散的方法。第一类方法一般需要通过跟踪光束传播轨迹来进行求解,如区域法、蒙特卡洛法和离散传递法。第二类方法的求解过程类似于一般偏微分方程的离散和求解,如离散坐标法、有限体积法、有限元法、谱元法、无网格法等^[54,55]。

在基于微分形式辐射传递方程全局离散的方法求解过程中存在两种类型的主要误差,即射线效应和假散射。一般认为,射线效应主要归咎于角度离散不当,假扩散主要归咎于空间离散不当,但同时这两种误差相互影响。相比于假扩散而言,射线效应会引起辐射场求解结果出现非物理振荡,甚至会带来求解结果趋势上的错误,因而是更应关注的一种误差。关于如何消除该类方法的射线效应问题目前国际上还没有很好的解决。

在锅炉炉膛、发动机燃烧室、尾喷焰、飞行器再入等高温强湍流条件下,辐射传输会与湍流脉动对流发生交互作用。目前除了直接模拟手段以外,国际上还没有发展出完善的工程湍流辐射交互模型。传统的热辐射传输的研究忽略了电磁波的偏振特性,然而根据电磁理论,界面反射、粒子散射均存在起偏效应,因而需要研究考虑偏振特性的辐射传输问题。传统标量辐射传输的求解方法并不能直接推广到考虑偏振辐射传输的情形,特别是针对梯度折射率介质存在较多困难。考虑偏振的辐射传输的求解方法还有待探讨。在具有跨尺度的辐射传输和耦合换热求解方面,尺度的跨量级变化使得计算域的离散和求解存在较大困难,对于跨尺度辐射传输及耦合换热的计算模型和方法还有待研究。实际介质的辐射参数具有随光谱复杂变化的非灰特性,在非灰介质辐射传输求解方面,高效高精度的多光谱求解方法是工程中进行大型高温过程辐射换热分析的重要手段,目前已提出的多种谱带模型虽满足了一定的工程需要,但在精度和计算量方面还有待进一步

改进。

目前,随着科学研究和工程应用对热辐射计算精度的不断提高,对计算热辐射学的研究提出了更高的要求。今后计算热辐射学方面研究的重点包括:①射线效应和假散射抑制方法的研究;②工程湍流辐射模型的研究;③梯度折射率介质内矢量辐射传递过程的数值模拟方法研究;④跨尺度辐射传递的多尺度和并行算法研究;⑤高效高精度的多光谱辐射换热求解方法。

4.2.5 传热传质测试技术

1. 高动态响应的测试原理与方法(飞秒-纳秒激光)

超短脉冲(飞秒-纳秒)激光技术及MEMS/NEMS^[56]等微/纳科技的飞速发展,为能源、信息、生物、材料和制造等领域带来了广阔的发展机遇。而随着时间、空间尺度的不断减小,随之而来的热问题越来越突出,其能量的传递与转换的微观机理也逐渐成为这些领域中的重要基础科学问题之一。能量传递与转换过程在微观层面都体现为载能粒子(固体中为电子、空穴和声子)间的相互作用,如在绝缘体中为声子间的相互作用;金属中主要为电子-电子、电子-声子间相互作用;半导体还要考虑空穴的贡献。其中,电子和声子间相互作用在百飞秒-皮秒时间范围;而声子系统中,相互作用在几十到几百纳米尺寸下,其运输的特征时间在百皮秒到纳秒范围。由此引入的飞秒、纳米时/空尺度下能量运输过程与常规时间尺度和宏观体材料有本质区别,体现出强烈的非平衡特征,并且极难准确观测,使得目前人们对飞秒、纳米时空尺度下能量运输机理的认识还停留在粗浅理论分析上,缺乏实验验证。这已成为热物理界乃至物理界迫切需要解决的最前沿的难题之一,给激光微加工、微电子器件散热和热电转换领域的发展带来了巨大挑战。

基于飞秒激光建立起来的飞秒时间分辨抽运-探测技术^[57]作为重要的实验研究手段,可以实现百飞秒至纳秒时间尺度的能量传递过程的测量。能够分辨并观测这些载能粒子间的相互作用过程,进而提供对微观能量转换与传递过程的观测及规律研究的实验手段,这也是载能粒子微观相互作用过程观测的唯一手段。同时,该方法具有极高的瞬时热流密度,所以热反射信号相对较强,且可以有较高的抽运光调制频率($10^4 \sim 10^7$ Hz),使得热信号向被测材料内部渗透的深度一般在几十纳米至几微米量级,是目前最适合于对微/纳尺度结构材料和界面能量输运性质进行测量的方法。

近几年,国际上越来越多的研究组应用该方法对纳米薄膜的热物理性质进行测量。但是,常规单波长系统具有信噪比过低的难题,因此双波长的设计方案成

为未来飞秒激光抽运探测方法的必然趋势。其主要思想是对抽运光和探测光使用不同波长的飞秒脉冲激光,在两束激光到达探测器之前使用具有高选择透过性的滤光片滤除加热激光。由于该种滤光方法的滤除效率可以达到 $10^{-9} \sim 10^{-7}$,大大优于应用偏振方法,可大幅(3个数量级)提高测量精度。同时,将该测量方法与近场光学系统相结合,可以实现小于 100nm 的空间分辨能力,使得对纳米空间结构或相分布材料的能量传输性质的扫描成像成为可能。通过对飞秒激光抽运探测方法和系统的研究与发展,可以建立完备的能量输运行为的微观研究方法,为解决微电子、光电子、半导体热电器件、高强度换热器及系统和热整流材料的设计和制造,以及超短脉冲激光微加工中的热问题提供必要的理论依据和实验基础,具有重要的学术价值和应用前景。

2. 非接触式测量、非侵入式测试原理与方法(红外热成像、MRI 测温)

目前应用较广泛的非接触式/非侵入式热物理测量方法主要有红外热成像、核磁共振测温、超声无损测温以及微波测温等。其中红外热成像与微波测温均是基于不同温度的物体其辐射波谱的不同来反演出温度信息。红外热成像仪一般包括光学系统、探测器、扫描转换器以及显示器等部分,其主要原理是通过光学的方法将所测物体辐射的红外波段(大约 $9 \sim 14 \mu\text{m}$ 波长)聚焦到探测器,并将探测器检测到的信号转换成相应的信号后推算出温度信息,该种测量方法测温范围较大,可以适用多种测量条件。其主要缺点在于仅能测量表面温度,对于深部温度常常需要通过传热反问题的分析获得,目前仍然处于研究当中。而微波测温技术^[58]则是通过检测表面的微波段辐射来反演出温度信息,主要是通过测量测试物体在微波段($30\text{cm} \sim 1\text{mm}$)的辐射。被测物体需要放置在一可屏蔽外部电磁场的腔中,以防止外界信号的干扰,物体内不同位置所辐射的微波被腔内天线所接收,通过放大器和处理器,根据计算和信号分析获得物体内不同位置的温度信息。微波测温技术的空间测试分辨率与所要测量深度处于矛盾关系。目前,其空间测试分辨率可以大概达到 1cm,同时测试深度可以达到 20cm。与红外测试相比,微波测温技术的测量精度较高,且可以获得较深位置的温度信息,但其测试装置较昂贵,测量过程控制较严格。

核磁共振(MRI)测温的方法主要基于含水物质中的 H 原子核在磁场作用下多个弛豫参数与温度相关性(见图 4.10)^[59]。在测试过程中,将被测物体放置在稳定的外部磁场中,其所含水分子的在磁场的作用下氢原子自旋排列方向改变,产生磁矩,磁矩和磁场的相互作用使得质子自旋能量分裂成一系列分立的能级,相邻的两个能级之差 $\Delta E = \gamma h B$ 。然后施加以频率适当的电磁辐射脉冲,如果电磁辐射光子能量 $h\nu$ 恰好为两相邻核能级之差 ΔE ,则原子核吸收该光子,发

生核磁共振,在去掉脉冲式电磁波后,原子核磁矩将所吸收的能量中的一部分以电磁波的形式发射出来,释放出与此相关的多种信号。目前,使用的MRI测温原理主要有:①纵向弛豫时间T1对温度的依赖性;②水分子的扩散速率随温度的变化规律;③质子共振频率(PRF)的化学位移与温度的关系;④质子浓度;⑤其他参数如体积磁化强度和磁化传递率等。其中基于质子共振频率的测量方法是目前使用最多的方法,因其时间响应相对很快,且测量准确性几乎与测试材料中的其他组分关系不大。基于弛豫时间T1、水分子扩散速度和质子共振频率所获得的为相对变化温度,若需获得绝对温度还需要有该同一物体在已知温度条件下的对照图像。MRI测温的方法与其他非介入式测量方法相比,无需电磁波的介入,测温的空间分辨率较高,但其实时响应性以及其高昂的测试成本仍然是制约其发展的主要“瓶颈”。

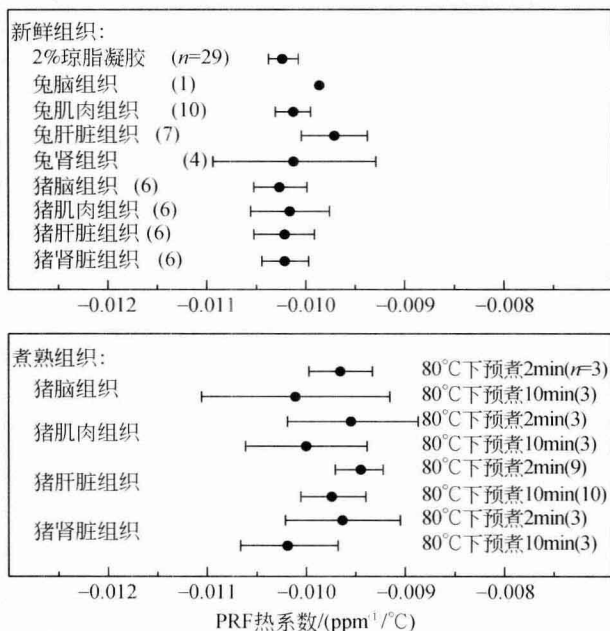


图 4.10 采用核磁共振温度成像技术测得生的和熟的兔和猪的组织 PRF 热系数^[59]

非介入式的测量方法还包括超声测温^[60]等。温度测量主要依据超声波在测试物体中的多个传输特性对温度的依赖关系。在测量过程中,将超声换能器紧贴在

① 1ppm = 1×10^{-6} , 下同。

所测试物体的表面,其所发射的超声波脉冲在传输过程中在材料中的某些结构界面发生发射(回声),根据回声传输的时间和速度,可以计算出结构界面与表面的距离,这也是超声成像的基本原理,根据温度改变后的声波传输的速度的变化或者分析得到的超声的衰减系数等的改变从而反推出温度信息。与其他无损测量方法相比,超声测温测试成本低,且具有可移动性,但声波传输参数的温度依赖性不够高影响了其测试精度,目前研究者们正尝试综合分析材料在温度改变后膨胀或收缩对声波的影响,以及耦合采用传热学分析的方法来提高测量精度。

总的来说,在这些无损测温的技术中,MRI的方法具有可以接受的精度、空间和时间分辨率,但测试成本最高;而超声测温在其测量精度内是一种有前途的低成本非介入式测温方法。

3. 微尺度集成式测试原理与方法

微尺度传热传质是伴随能源、信息、材料、生命、微机电等学科快速发展而兴起的前沿学科,是经典传热传质学的延伸和拓展。对微尺度基本热物理量(温度、压力、流量等)的精确测量是深入揭示微尺度热质传递机理的前提,也是检验微尺度传热传质理论研究和数值模拟成果的关键。基于成膜、溅射、光刻、腐蚀、键合等MEMS标准工艺,将微型测量元件直接集成在微器件上的微尺度集成式测量技术具有高精度、高灵敏度、高可靠性,低成本、低能耗,可复制性强等一系列突出优点,是微尺度研究的重要手段。下面分别介绍微尺度温度、压力和流量的集成测试原理和方法。

微尺度温度的集成测试原理和方法主要有热应变法、热电阻法、热电偶法以及基于光的折射原理的集成测温技术等^[61]。热应变法利用材料的热应变特性,将热膨胀系数较大的材料通过MEMS工艺集成到被测元件上,通过应变材料受热膨胀产生的位移量得到温度值。热电阻法利用材料的热敏电阻特性将铂、渗磷多晶硅等一些电阻随温度具有良好线性依变关系的材料集成在芯片上,通过测量材料受热引起的电阻变化得到温度值。热电阻法测量精度高,性能稳定,是一种较为常见的MEMS测温方法。热电偶法是将两种不同的热电势材料集成在被测元件上,通过两种材料连接处产生的接触电势差与温度的对应关系获得温度值。该方法缺点是由于所获得的接触电势值较小,易受电路噪声干扰。基于光的折射原理的MEMS测温技术主要是利用固液或气液界面处温度的变化导致界面处折射率的变化来实现对界面处温度的测量,由于该技术采用激光,时空分辨率很高,并且半导体激光器和光电二极管检测器可直接集成在芯片上,因而适宜微流控体系中的温度测量,但要求测试芯片具有一定的透明度。

微尺度压力的集成测试原理和方法主要有压阻法、压电法、电容法、衍射光

栅法等。压阻法利用材料的压阻特性,将电阻随压力呈现显著变化特性的材料(如掺杂镍粉的凝胶等)集成在芯片微流道壁面,通过检测其电阻的变化得到当地的压力变化。压电法利用材料的压电特性,将压电材料(如聚偏二乙烯氟化物PVDF等)集成在微通道侧壁或底部,通过测量不同压力下电信号的变化,得到通道内的压力变化情况,这是目前较常用的测压方法。电容法利用流体介电常数随压力变化,进而引发电容量变化的特性来测量压力。通过在微通道两侧集成电容器,测量电容量变化得到流体压力,该方法适合于等温流体的测量。衍射光栅法测压原理是:将可变形的衍射光栅集成在微通道壁面,流体压力导致光栅变形,从而改变光路,光路的改变使得衍射光强发生变化。通过标定的压力与光强的关系曲线可测得通道内的压力变化。该方法时空分辨率高,但要求芯片微通道具有一定透明度。

微尺度流量的集成测试原理和方法主要有温差法和压差法等。温差法测量原理是:在流道上游对流体加热,在下游某处检测流体温度变化,得出加热前后的温差,再根据热量守恒关系式得到流体流量;该方法易于集成,但不能用于对温度敏感的生物流体的流量测量。压差法测量原理是:在其他条件不变的情况下,通道内的流量随着压差增加而增加,通过检测流道压力变化而得出流体流量。由于压力测量方式多样,因而该方法较为常用。

随着微纳集成技术的发展,借助于微尺度集成测试技术和方法对微尺度流体流动与传热传质特性进行精确的实验研究已成为未来发展趋势。

4. 多维场测量原理与方法 (SThM、拉曼)

传热传质测试技术随着先进传感技术、光电、光谱和图像检测处理技术,以及信息分析技术的进步而进步,从单点向多维、从静态向动态、从离线到在线测试方向发展,为传热传质现象和过程机理研究提供了越来越丰富的测试手段。在由温度梯度引起的流动中,流场的温度和速度场测量对于传热传质研究非常重要。热色液晶(thermochromic liquid crystals, TLCs)测温技术^[62]利用热色液晶材料随温度变化而迅速改变其反射光颜色的特性测定表面温度场分布,是一种新型光学测温技术。热色液晶测温技术出现后,得到了传热传质界的重视。与传统的测温方法相比,热色液晶测温技术具有直观显示、全场测量等优点。现代激光诊断技术可用于对湍流火焰内部进行高时间、空间分辨率结构成像分析,以研究湍流流动、化学反应、热量和组分的分子输运过程之间的耦合。这些进展使得模拟研究中的概念能够通过实验进行检验。从二维以及三维激光诊断测量中可确定热梯度以及火焰厚度分布,对理论模型预测的火焰前锋厚度进行对比。激光干涉检测技术具有检测空间介质折射率多维分布的能力。除了管内截面平均空泡率,气

泡上液膜的分布对于微尺度管内气液两相流现象的研究十分重要。Fizeau 干涉仪已用于气液边界液膜厚度分布的测量,进而精确获得液滴的接触角,同时测量微通道内运动的气泡的液膜的三维断面。Mach-Zehnder 干涉仪已用于测量流经管内水流的温度分布,进而获得局部换热系数和努塞尔数。

多场耦合条件下的传热传质过程热物理量分布的检测是具有挑战性的难题。对于非均匀分布的、非等温的热流体对象,典型的如燃烧火焰对象,其温度分布、辐射传热及其热流分布、燃烧介质的组分、浓度分布等的检测手段的研究,近年来取得了一定的进展。已发展基于热辐射图像分析处理的燃烧火焰二维、三维温度分布及其辐射特性检测的方法和技术。在多场检测研究中,检测方法的非接触特性使得传热传质热物理量场的信息获取问题是典型的病态反(逆)问题,就像在导热逆问题研究中遇到的一样。例如,有研究试图采用迭代正则化方法和共轭梯度法相结合的方法从边界温度分布检测中反演热流分布,这是一个三维非稳态、非线性逆问题。发展多场耦合的传热传质过程在线检测的技术,需要在理论上解决多场耦合的复杂逆问题求解的理论和有效方法。

温度是最基本的物理量,反映微观能量载体运动的状态,温度的精确测量对基础研究和工程应用均有重大意义。微电子、微机械以及纳米技术的发展带动了本领域微纳尺度传热学研究的快速发展,也对高空间分辨率温度探测带来巨大挑战,现有常规测试手段无法达到亚微米/纳米的分辨率,因此亟须发展高空间分辨率温度技术,以推动相关研究领域发展。

近年来,通过国内外学者的努力,在高空间分辨率温度领域取得较快发展,其中以扫描热显微镜(SThM)技术和共聚焦显微拉曼光谱(RMS)技术最具前景。SThM 技术^[63]是基于扫描探针显微镜(SPM)(包括扫描隧道显微镜和原子力显微镜等)发展起来的接触式测试技术。SPM 能够探测纳米空间范围内的物体形貌及其他物理量。诺贝尔奖获得者 Nonnenmacher 和 Wickramasinghe 首先采用原子力显微镜测量薄膜表面温度变化,进而推导出薄膜表面导热系数。通过对原子力显微镜的发展,美国工程院院士 Majumdar 的课题组发明出可以研究几十到几百纳米尺度范围温度分布的 SThM。SThM 的空间分辨率主要由三方面决定:①探针的尖锐程度;②探针与样品之间的传热机制;③探测器的热设计。现阶段除去 SThM 仪器本身分辨率和灵敏度需进一步提升外,在 SThM 应用方面,仍存在诸多限制,首先 SThM 技术是一种接触式测试技术,探针与样品表面不可避免发生接触,这类接触受多因素影响,如样品硬度、表面粗糙度、接触压力等;其次,纳米尺度测温涉及的微观能量输运机制需进一步阐明;再者,利用 SThM 测量微纳区域热物性,涉及的加热方式(如通过探针注入热流或聚焦激光束加热)和热量测量技术都有待新原理的建立和新方法新技术的开发。

共聚焦显微 RMS 技术^[64]根据拉曼散射频移的温度依赖特性,通过精确测量拉曼散射的频谱分布,结合共聚焦激光扫描,获得高空间分辨率的温度分布。近几年,由于石墨烯、碳纳米管、碳化硅薄膜等先进材料的不断开发和应用,共聚焦显微 RMS 技术成为高空间分辨率温度和热物性测量的研究热点之一。现阶段共聚焦显微 RMS 技术仍存在诸多限制:首先聚焦激光的光斑大小接近 $1\mu\text{m}$,难以实现亚微米/纳米空间分辨率的测量;其次拉曼频移温度系数很小,例如,对于单层石墨烯, G band 峰的频移温度系数仅为 $-0.016\text{cm}^{-1}/\text{K}$,当温度变化 10K 时, G band 峰仅仅位移 0.16cm^{-1} ,这极大地限制了其测量能力;再者采用共聚焦显微 RMS 技术测量热物性时,与 SThM 技术类似,加热方式和热量测量技术尚不完善,比如在测量石墨烯导热系数时,激光加热能量无法直接测量,只能利用高度定向热解石墨来标定石墨烯吸收率的方法间接计算加热量,而这种做法尚缺乏理论上的依据。因此迫切需要提高共聚焦显微 RMS 技术的分辨率,以实现纳米空间分辨的原位温度测量方法,如把该技术同近场光学技术、SPM 技术结合,发展新原理新方法,开发新技术;需要提升共聚焦显微 RMS 技术的灵敏度,如结合拉曼频移和强度双信号确定温度,强化探测系统的光学设计;在热物性测试时,需要发展新的加热方法,开发新的热量测试技术,实现包括导热系数、热阻等多物理量的测量和解析。

5. 传质测量原理与方法

随着传感技术的飞速发展,物联网已逐步渗透到环境卫生和食品安全等健康相关领域,其中必然涉及大量低浓度成分的测量问题。发展可控的定向传质测量技术,对于解决低浓度、多组分化合物的测量问题十分重要。例如,在室内空气品质领域,人们待在室内挥发性有机化合物/半挥发性有机化合物(VOC/SVOC)长期暴露的环境中会严重影响身体健康,若能实时获得环境中相关污染物的暴露水平,就可及时采取相关措施,降低其对健康的负面影响。目前广泛采用的环境 VOC 浓度测试方法为手动抽样采集,不仅需要大量的人力成本,而且不具有时效性,而可达到环境低浓度 VOC 测试精度的传感装置价格昂贵,尚不适合大面积推广。

新材料技术可实现对多孔材料特定孔径及特定排布的构造,采用特定的多孔材料用于传质测量,可实现特定的可控传质速率。此外,纳米材料作为探头材料也为低浓度污染物测量提供了新途径。通过将传质测量与电子鼻技术结合,探索材料(包括纳米纤维)物性随目标组分及其浓度的变化规律,有望发展低浓度污染物浓度在线测试方法。其关键问题如下:①浓度敏感材料物性测定及其与影响因素的关系;②根据浓度测定要求反求材料物性要求的方法;③浓度或污染暴露量探头设计原理和方法;④材料多组分传质、吸附特性及其与浓度测定精度和

稳定性的关系；⑤浓度信号的无线传输。

传质测量^[65]具有广泛的应用前景，可满足环境、卫生、食品、工业、航天、公共安全等领域对低浓度目标污染气体浓度及暴露量实时监测的需求，实现环境安全和生产作业的全面信息化。

4.2.6 交叉研究

1. 生物传热传质及其发展态势

生命科学领域的蓬勃发展带动了多个学科的进步与前进，与生命科学交叉几乎存在于各个学科，这些学科的创新与交叉是新时期取得重大进展和突破的唯一途径。生物传热传质正是应运而生的广泛交叉于生物学和临床医学等诸多领域的最新学科前沿之一，其核心在于探索各种空间、时间尺度及温度范围内的生命最基本的特征之一——物质和热（能）量的传输规律，并加以充分应用，其学科前景在于通过热科学理论探索、数值模拟、实验研究和设计制造手段达到：创新和拓展新的传热传质学基础理论和学科内涵；为日益增长的激光手术^[66]、肿瘤治疗、低温外科、生物材料冷冻保存、低体温康复、疾病热诊断、人工器官、烧伤、烫伤、冻伤、乃至肿瘤诊断等临床医学和康复医学发展提供相应理论依据和新的手段；为热生理机制探索，包括热舒适、热感觉等复杂生理、心理问题的解决增加科学储备；为各种冷/热医学仪器、热理疗仪、热诊断仪、热保健器械及生物技术产品的开发奠定基础。在许多现代最先进的生物技术及一些新型疾病治疗方面，热科学所能发挥的关键作用已见端倪，开展相关研究既富有重大的现实意义，又有深刻的学术内涵，为国际学术界和产业界竞相关注。

生物传热传质学科研究方向涉及如下方面：从分子、蛋白水平到细胞、亚细胞层次，再到组织、器官直至整个生命个体内的多尺度热量和质量传输现象研究；对疾病热诊断与治疗中所体现出各种宏观、细观和微观热生理机理、生命热现象物理本质乃至传统医学技术等加以热学解释、阐明和数理描述，以及将热物理学手段应用于生物技术及医学临床实践；人体各种物理、化学作用的热学效应，具有重要医学意义生物热学数据测试；生命这一特殊系统与热环境相互作用，其正常生长与异常生长的能量差异；发现新的生物热学现象和热学规律等。本方向所涉及传热学、生物学及医学技术方法和概念在各自学科领域内均具有突出的新颖性，必将丰富和发展工程热物理学科的理论体系，给医学生物技术带来全新的命题和概念，有关创新突破将带动相关领域的进步，对我国医学技术现代化及促使生物传热学进入国际先进水平具有重要的意义。

从生物传热传质学发展现状来看，近些年来，热物理的介入大大带动了生物

医学领域的多个方向的发展（见图 4.11）^[67]，如肿瘤治疗、器官移植、人工肾、人工肝、烧伤、中暑诊断、心血管疾病、神经性疾病的治疗、再生医学等，生物传热传质学这一学科也有了较大的发展。

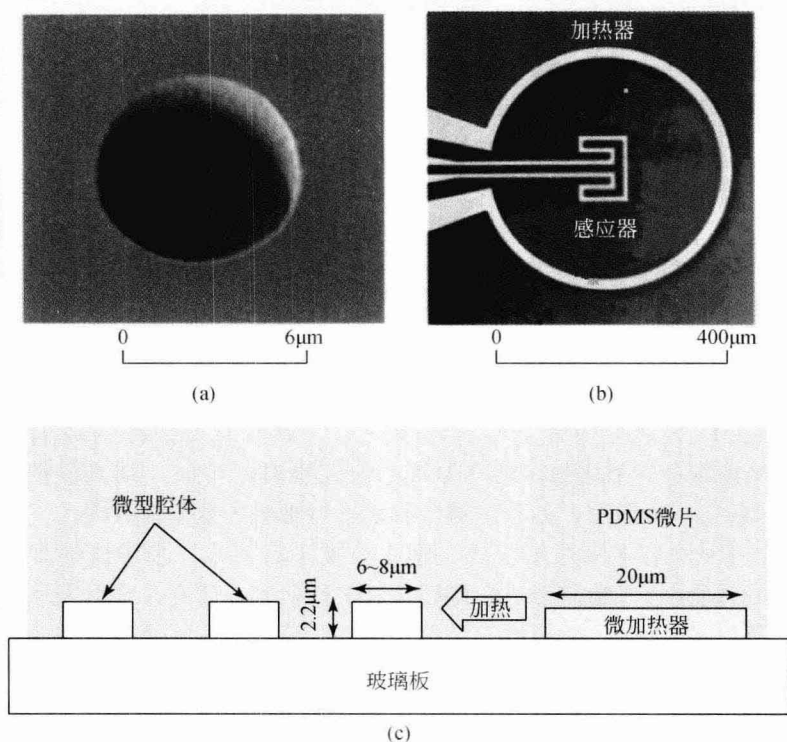


图 4.11 测试 β -半乳糖苷酶高温活性的微换热器示意图^[67]

目前，生物传热传质学领域的研究相对集中在对于生物传热传质的应用基础研究，如肿瘤的热物理治疗，干细胞、血液、组织、器官、工程化组织的低温保存，激光手术，药物输送等方面。

肿瘤的热物理治疗包括肿瘤的高温治疗、温热治疗、低温手术，以及近年来新提出的冷热交替治疗等。其中温热治疗与高温治疗经过数十年的研究，已经在临床上得到了较广泛的应用，但由于实时、无创温度信息的缺乏，大大影响了治疗剂量的精确计量以及治疗过程的实时监控，从而制约了进一步的发展。对于肿瘤低温治疗^[68]，目前的研究主要集中在低温损伤机理，以及低温条件下生物组织内相变传热研究。冷热交替这一新型热物理治疗方式的提出给肿瘤热物理治

疗带来新的发展契机,已有研究发现肿瘤冷热交替治疗具有以往单一疗法所不可比拟的优势,特别是对于转移性肿瘤的治疗,有可能据此发展出全新的有效治疗方法。目前,肿瘤冷热交替的多个关键的热物理问题已经得到初步解决,但其治疗机理仍未能完全明晰,特别是其由于单一疗法的根本机制以及如何得到最优化治疗方案,仍然需要进一步深入探索与研究。

随着纳米的发展,纳米药物以及很多靶向性的纳米材料被制造出来,它们在生物医学上有着越来越广泛的应用,并应用于生物医学;也有部分研究者开始尝试利用不同的纳米粒子来增强肿瘤热疗或低温手术的治疗效果,已取得了一些成果,但这些方面的研究仍处于初步尝试阶段,特别是纳米粒子在生物体内的传输及其在不同尺度上与生物系统相互作用机制本身就是一个有待解决的生物学与传热传质学高度交叉的课题。此外,纳米粒子的安全性以及纳米尺度生物体内传质与传热的耦合等均是研究空白,有待研究。

生物组织器官的低温保存,近些年有较多进展,且研究主要集中在低温损伤机理方面,如胞内冰晶形成、胞内冰晶的传输、胞内冰晶生长模型修正等方面;而在低温溶液的玻璃化研究上也有较多突破,如低温保护液的玻璃化相变规律^[69];在低温保存的策略如定向降温等的研究也有所突破。纳米科技同样也开始在低温保存上有所引用,如利用纳米胶囊进行细胞的低温保存等。

激光临床手术临床治疗皮肤病、癌症等属于高功率、多尺度的多相传递过程,近年来有研究者开始从传热学角度对其进行研究。研究工作涉及适应人体组织复杂生理结构的激光传播模型、考虑人体皮肤解剖结构的生物传热模型、瞬态喷雾冷却特性、细胞死亡机理等方面。目前,上述工作尚处于起步阶段,将上述理论模型相互耦合最终形成针对特定病人的个性化治疗仍然需要进一步的研究。方案还有很长的道路。

在生物传热传质学基础理论研究方面,则主要是大血管、血液灌注率^[70]以及生物组织类别对于生物传热学效果的影响分析,在生物组织作为多孔介质的生物传热学分析方面也有所涉及。

除了在以上几个方面的研究外,生物传热传质学这一研究的范畴还开始在其他生物医学的领域中拓展,如聚合酶链式反应、药物输送、中医舌诊等中的传热传质问题。

总之,近些年热物理在生物医学领域的应用及交叉发展较快,许多与热物理相关的技术和方法被认为是临床医学中的关键技术。但由于生物传热传质学牵涉众多热物理、工程、生物学、临床医学等问题,研究的复杂程度高,往往需要多学科协同攻关,很多研究方向至今与医学实践之间还存在一定距离。此外,目前生物热物理研究较多都在局部条件下进行,系统化研究远远不够。国家自然科学

基金委员会近年来也一直将此作为优先发展领域,早在1997年就曾以“生命科学中的热物理问题”为主题主办过一次香山科学会议。随后的数年内支持了3项国家自然科学基金重点项目和两个杰出青年基金。近年来,国内在生物传热方面的基金申请数目也呈上升趋势,显示出这一领域的吸引力。我国在生物传热学方面的研究虽起步稍晚,但与国际相比具有并不落后的基础和研究条件,特别近年来在许多环节上做出了一批具有重要意义的创新性贡献,为开展更为深入细致的系统化研究奠定了基础。值得指出的是,我国具有与国外研究机构所无法比拟的优越条件,例如,由于人口基数大,病例较为广泛,素材多,易于收集和分析,还有独特的中医中药,生物医学传热传质基础研究与热技术实用化完全可以在结合医学、生物学、热物理、仪器科学等得到快速推进。我国生物传热传质学研究已走过初创、进入快速发展阶段,作为工程热物理领域内极具发展前景的新兴交叉学科之一,既是传统热科学赖以拓展和取得重大进展的生长点,也是建立诸多生物医学技术的关键工具。可以预计,今后将会有更多创新、更大发展。

2. 能源转换与储存中的传热问题

随着太阳能等可再生能源技术的发展,能源转换与储存中所涉及的传递问题成为国际能源领域的研究热点之一。由于太阳能具有能流密度低、昼夜间歇性、随地球自转辐照强度不断变化的基本特性,各种高效的太阳能利用方式都需要通过太阳能聚集转换和存储技术来提高能流密度、实现稳定的能量供应。太阳能高效利用方式主要包括光-热转换、光-电转换、光化学与光生物转换几类,其关键热物理问题包括能源聚集、转换与储存过程,需要将导热、对流与辐射三种传递方式进行耦合分析(见图4.12),同时广泛涉及新型能源材料的结构设计 with 性能调控、高能流密度高温交变环境下热质传递特性、多尺度多相多场耦合传递和反应等问题,这些传热传质问题为能源材料与工程学发展提出新的研究方向和发展目标。

太阳能光-热转换^[71]为高辐射能流密度、高温交变热应力冲击的非稳态非均匀传递过程,其中紧密结合的传递现象包括质量、热量和动量传递,传递过程中变物性与多相态工质的传输机制非常复杂。太阳辐射聚集是太阳能高效光热转换的基本前提,已开展太阳能分频高效热利用辐射热力学理论、太阳能低成本高效聚集的光热辐射频谱特性与传输^[72]、太阳能流高效传输的非成像聚光机理等基础研究,给辐射传热引入新的交叉研究课题。聚光太阳辐射的光热转换是太阳能高品位热利用的关键技术,涉及太阳选择性吸收材料的设计原理和光热学特性、太阳辐射能流聚集与吸收的时空协同输运及转换规律^[73]、高温交变环境下吸热表面热应力分布特征等挑战性课题,相关研究对基本科学问题的认识和能源利用系统的创新都具有重要意义。

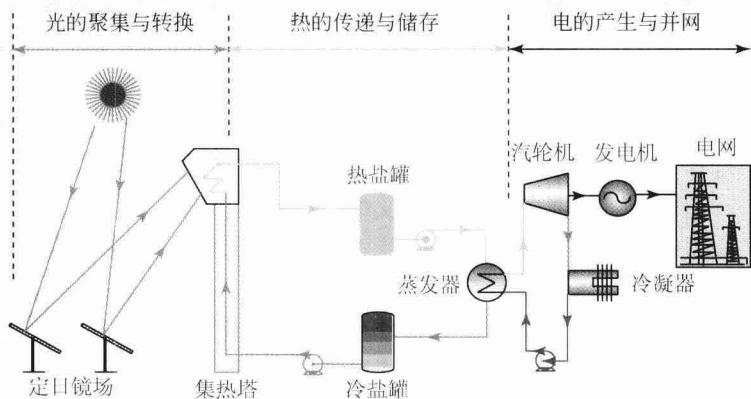


图 4.12 太阳能热发电系统的能源转换与存储问题

太阳能光-电转换主要通过半导体材料将太阳能转换为电能，与光热转换的基本原理和技术内涵不同，但应用上却可以兼容和互补。针对提高太阳能光电转换效率的需求，从微/纳尺度揭示太阳辐射光子在太阳能光电转换系统中的传输机理，建立高效太阳能吸收器光谱特性的控制方法，发展高效太阳能光电转换系统的微/纳尺度热力学基础理论，形成基于微/纳尺度热辐射基本原理与光谱特性的高效太阳能光电转换及热光电转换系统设计方法。部分研究者对储能蓄电池进行探索，特别考虑蓄电池的材料设计与储能密度、蓄放电过程中的粒子迁移与能量传递等课题。另外，太阳能光伏与光热协同应用的研究正在推进，而且与低能耗建筑、冷热电联供系统等相结合，正成为能量转换与传递研究的新热点。

太阳能光化学和光生物转换的研究目前集中于太阳能制氢领域。太阳能光化学制氢的关键问题包括高效稳定低成本的可见光催化剂的研制与高效稳定的光催化反应体系的构建，特别揭示各种光催化剂分解水制氢机理和能量转换效率，确定多相光催化反应体系中辐射能量传递及分布的规律，运用等离子激元基本原理制备高效光催化粒子，建立化学动力学模型并优化光催化反应体系。太阳能光生物制氢作为含有生化反应的多元多组分的多孔介质系统^[74]，目前主要探索生化反应、内扩散等因素以及复杂的两相流体流动对反应系统内部质量传输特性和产氢效率的影响机制。

能量的储存是能源科学的重大问题，对国民经济和国防建设的发展有重大的战略意义。蓄能技术在余热回收、太阳能、风能、地热、潮汐等可再生新能源的开发利用以及电力调峰等方面都有着非常广泛的应用。它是各种新能源利用技术的基础，也是目前能量科学的前沿。蓄能技术需要综合应用现代工程热物理学、材料

学、化学及晶体物理学等多种学科的知识, 其中涉及一些非常复杂同时也非常重大的科学问题, 包括高性能传热蓄热材料的制备和蓄热系统的传热强化与建模。

研究高效能传热蓄热材料的设计制备方法及传输机理, 不仅关系到蓄热系统运行的可靠性和稳定性, 而且是保证能源转换利用实现高效低成本的重要环节。传热蓄热介质的基础科学问题包括三部分, 即材料设计、制备与物性表征。高温蓄热过程是一典型的多尺度结构多相多场驱动的耦合传热传质现象, 涉及三个不同尺度层次: 微观尺度(分子运动分析)、介观尺度(界面传递规律分析)和宏观尺度(蓄热器传递特性), 目前已开展的研究包括: 高温传热蓄热过程多尺度结构中流动与传递规律、高温传热蓄热熔盐材料设计、制备与表征^[75], 熔融盐材料使用过程中熔融与凝固过程^[76], 包括熔盐的特殊核化与界面传递等物理现象, 涉及材料、界面与工程热物理等多学科的交叉问题; 中低温蓄热过程热特性研究, 涉及低能耗建筑相关的中低温储热材料、蓄冷系统的冰晶结构和复合材料、各种水合物储放热的微观机理以及其他方面的储热研究均比较有成效, 有力推动能源材料交叉学科的发展。化学储能将能源转换和存储有机结合, 广泛应用于太阳能光化学转换与长期储能领域, 包括结晶水合物、氨化物、多孔介质与复合材料等多种化学储能材料的制备, 化学储能过程的可逆性和长时段演化, 化学储能材料储能用能过程的耦合与强化等。国内化学储能的研究方向主要为材料制备, 但储能相关的材料学和热物理基础研究较少, 迫切需要加强。图 4.13 有相变和无相变储能系统时房屋地板加热系统的性能对比。

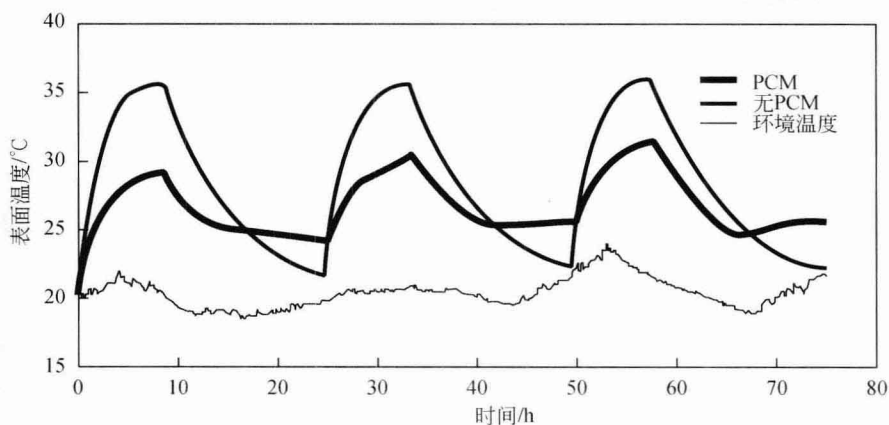


图 4.13 有相变和无相变储能系统时房屋地板加热系统的性能对比^[76]

分布式供能系统以冷热电联供为主要形式, 具有高效、环保、经济、可靠和

灵活等特点,能够大幅度节能减排。目前,欧美国家正在启动“智慧能源”革命,分布式供能是其核心技术。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》已将分布式供能技术定位为能源领域前沿技术。为解决现有分布式供能系统变工况性能差、冷量输送密度低等技术难题,针对分布式供能系统(含多能源互补)的特点和用户侧负荷特性开展分布式蓄能研究具有重要意义,这其中涉及理想蓄能系统和蓄能材料遴选原理与评价、蓄能/释能系统热性能控制方法、蓄能与分布式供能系统稳定高效运行的调控机制等。

3. 热质理论及其发展态势

现有的传热学仍然有着某些不足之处,一些重要问题还没有得到很好的解决,特别是随着高新技术(如纳米技术、飞秒激光)的发展又面临着很多新的挑战:

(1) 经典的传热规律面临极端条件下传热现象的巨大挑战。例如,以激光的利用为代表的超快速加热,如激光武器和激光加工技术,激光脉冲宽度可达到飞秒(10^{-15} s)量级,傅里叶导热定律描述瞬态导热过程时,由于所得到的热传导方程是抛物型的,这隐含着热是以扩散的方式传播,如何预测激光加热过程是一个国际性的难题。近些年来以纳米电子机械系统^[77]为代表的纳米技术得到快速发展,超大规模集成电路中的互连引线尺寸已达到几十纳米的水平,纳米电子机械系统中的部件也出现了很多纳米尺寸量级的薄膜、纳米线和纳米管材料。在纳米结构材料的导热中,由于热流密度很高,如在实验室中可达到 $10^{9\sim 12}$ W/m²量级,已经发现傅里叶导热定律也不再适用。探讨极端条件下的热学规律已经成为亟待解决的重要问题。

(2) 经典热学中还没有以提高能源利用率为目的的传热过程的优化理论和技术。当前面临世界性的能源短缺问题,我国面临的节能减排的形势更为严峻,因此,提高能源利用效率更为重要。然而,传热学中只有热量传递速率(如热流密度)而没有传递效率的概念,所以,只有传热过程的强化,而无传热过程的优化的理论和技术。因为效率的概念往往需要了解某种特定的付出和回报,如衡量热机工作性能的热功转换效率,付出的是输入热机的总热量,而回报是热机输出的机械能,但是,在经典热学中传热过程付出的是“温度梯度”而回报却是热量,不能建立传热效率的概念。可见,现有强化传热技术中还缺乏对传热过程付出和回报的深刻认识。

(3) 传热学缺乏同物理其他分支学科之间共性的量和规律。傅里叶在他的热学专著《热的解析理论》中指出:“……自然哲学的这一部分不可能与动力学的理论有关,它有它本身特有的原理。”因此,直到现在热学中没有热量运动速

度、动量、力等物理量,没有类似于牛顿运动定律那样描述热量运动的定律,即无法用动力学的理论来研究热现象。尽管在不可逆过程热力学中有热力学力等概念,但讨论的却是热力学力和热力学流的关系。还有,最小作用量原理是自然界最高的原理之一,在物理学的各分支学科中,建立相应的最小作用量原理是探索物理规律、寻求极值和进行过程优化的基本途径。迄今为止,光学、力学、相对论和电磁学等学科都已建立了相应的最小作用量原理,而经典传热学中还缺乏对最小作用量原理的探讨。

从学科发展的角度看,这些问题促使人们思考,出现上述现象的原因是什么?是因为热学中的基本概念有不足之处,还是缺乏某些基本物理量,这就需要对热学中最基本的概念和规律进行讨论和研究,所以就有必要对热量的本质作进一步的探索,在此基础上扩展和发展现有的热学理论体系。基于爱因斯坦质能关系式可以揭示出传递过程中热量具有质量的属性,这涉及物理学中的基本问题;基于热量具有质量的属,因此可望采用动力学方法研究热质流体在介质中的运动,这涉及与力学学科交叉的问题;传热过程的不可逆性及其优化,又与热力学密切相关。热质理论的应用又广泛涉及纳米技术(微纳电子机械系统、激光加工、微电子等)、材料(热物性表征、低维及复杂结构材料的热分析和热设计)、生物医学工程(生物芯片^[78]的传热和流动控制、微纳热传感器等)等学科。所有这些正是热质理论不断发展的内在和外在驱动力。

热质理论近些年的建立和发展,一是受到节能减排和高新技术领域发展的重要驱动,二是满足热学学科自身不断发展的内在需求。2010年3月26~28日中国科学技术协会举办了以“热学新理论及其应用”为主题的“新观点新学说学术沙龙”,来自传热、制冷、建筑、材料等和能源有关的国内外60多位学者参加会议,对促进该领域研究的发展进行了探讨,目前国外不少学者已开始关注热质理论领域的研究进展,一些研究人员开始从事相关的研究。

热质理论目前还处于建立和初期发展阶段,主要研究方向包括:①热质、热质运动、热质能等基本概念的物理阐释;②热质流体的基本性质和热质运动的分析方法;③普适导热定律的建立和应用;④揭示传热过程中的新物理现象;⑤建立传热学的最小作用量原理;⑥基于热质能耗散极值原理的传热设计方法、准则和技术;⑦在纳米技术、生物技术、建筑、材料等应用和交叉领域进行不断拓展和延伸。

热质理论的不断完善、发展和趋于成熟有赖于和物理学、力学和前沿应用技术领域的密切交叉,有赖于国内外学者进行密切的交流和合作,有赖于基础理论和工程应用的紧密结合。在多学科交叉、多领域合作、多层次开展研究的共同作用下,热质理论有望成为一个具有一定革新性的研究领域,将取得重要的研究

成果。

4. 其他交叉领域

如前所述,温度和浓度变化引起的各种物理化学过程都涉及传热传质,探究热质传递现象、规律以及对过程影响作用等均属于传热传质学范畴。实际上,在日常生活、社会活动、自然世界和利用、维护与改造自然的一切行为过程中,都有能质传递相伴随,也就是说传热传质几乎无所不在,各种研究的相互融合比比皆是,形成交叉前沿不足为奇,这也正是传热传质学持续兴旺发达、生机勃勃的原因所在。与其他一些高新技术领域、各门类学科和工程技术应用、甚至传统产业交叉融合,都已产生、提炼出诸多的新兴学术方向和前沿热点领域,从某种程度上的共同基础和科学问题看,的确可融合或者介于前两者之中,但也有其突出的特色和新颖性。近年来,传热传质学与材料、高新工艺过程、激光和等离子等加工技术、生态大气环境、资源开发利用、农林牧业工程、建筑屋宇环境和节能、军事、宇航,以及涉及国家、社会、生产与资源环境安全、公共安全、信息光电等的交叉方兴未艾,而且在整个工程热物理学科内外的学科交叉热点也层出不穷,不断呈献给人们以色彩斑斓的创新成果,此方面始终蕴含着巨大的基础探索世界。总体上,国外更多显现在高薪科技和新兴行业,国内则在与传统学科与技术应用领域、工艺现代化改造、结合中国特点的新技术发展与环境污染治理、清洁能源利用等方面凸显出优势。

4.2.7 研究方法和技术手段

传热传质学是在实验基础上发展起来的一门学科,随着科学技术的不断发展,其研究方法和技术手段依然主要依靠理论分析、实验研究和数值模拟等。在理论分析和探索研究中,研究者几乎引进、使用了已有的现代数学、物理和化学等基础理论和方法,或至少留有一定现代科学理论基础的痕迹,也由此不断产生出新的学术思想和研究方向。在实验研究中,现代高科技手段应用层出不穷,高速高分辨率可视化、激光粒子成像、核磁共振^[79]、无损 CT 层析^[80]、电镜技术、原子力镜表面与表层分析、隧道显微、能谱色谱分析、数字化信息处理等,发现和展示出诸多新现象、新规律,也是传热传质学研究实现从方法手段的跨越到对象、内容和应用面等的大范围扩充,研究对象从宏观到微观,极大促进了学科内涵延展深化,呈现出前所未有的生机活力。在数值模拟方面,基于计算机技术和计算数学理论与方法的日新月异发展,尤其现在大型集成化、超容量、超快速计算技术的兴起,数值模拟结合现代高科技显示测量,已是传热传质研究中观察显示物理特性的强有力手段,得到广泛应用。有关的

流动与传热传质计算方法和技术,在借鉴、移植和融合其他学科及其不同领域数值模拟最新成果同时,自身越来越形成独特风格、框架体系。早期研究者们多应用有限差分、有限元、边界元、有限容积及蒙特卡罗等方法进行了卓有成效的工作,也发展出不少颇有特色的计算方法。过去的数十年在分子动力学、格子-玻尔兹曼、耗散动力学模拟、流固耦合等传递现象分析方面也取得令人瞩目的成果,呈现出蓬勃发展的强劲势头。现今国内外学者都已注意到传递过程中的多尺度和跨尺度效应,其在物理过程、现象认识和实验观测上都显现出新的思路和观念,更引起人们对发展多尺度和跨尺度计算方法与数值模拟的兴趣,已开始了实质性的探索。

4.2.8 差距分析

表4.1列出了17种与传热传质学相关的国际学术刊物1999~2009年期间影响因子的变化情况。从2005年1月到2010年12月世界各国研究人员在上述17种期刊共发表论文15308篇,各主要国家论文数据情况见表4.2,中国内地研究人员在此期间的论文发表变化情况见表4.3和表4.4。需要说明的是,上述表格并未将许多学者和研究人员发表在相关交叉学科领域刊物上的论文统计包括在内。但表4.2~表4.4中这些并不全面的数据仍然强烈地昭示出,我国在传热传质领域的研究工作近年正在非常迅速的崛起,在国际舞台上发挥着越来越重要的作用,尤其在与国际交流和国际学术接轨方面迈出坚实的步伐,已很好地融入国际学术界,成为一支重要的基础研究队伍。但相比而言,虽然近年来我国学者发表在国际期刊论文的数量已占有越来越大的比重(2010年占世界全部论文数量的19.9%,2005~2010年论文综述居于第二位,仅次于美国),出席国外举行的国际会议和参与国际交流的人数逐年增多,但我国的整体水平与先进国家显然仍有很大差距,主要体现在:在国际上发表的论文依然比较集中在某些单位和个人;在国际学术组织、重要的国际会议中扮演重要角色的人员偏少;我国学者发表论文被国际学术界同行引用的篇次仍然普遍较低,尤其是被欧美发达国家的学者引用更少。

客观地认识我国传热传质学科学研究水平和与国际学术界的差距,显然十分有益于思考和确定我国的学科发展战略。国内的研究目前已呈现很好的发展势头,必须继续坚定不移地融入世界学术大潮流,特别注意基础理论研究原创性、系统化和深度,改变应用基础和技术多停留在传统内容层面的现况,努力缩小与国际学术发展的明显差距,尤其要关注直接服务于高新技术或直接在高科技发展中发挥关键性作用的创新性工作。

表 4.1 17 种主要刊物近年影响因子变化统计

序号	刊物名称	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
1	<i>International Journal of Heat and Mass Transfer</i>	0.719	0.654	1.240	1.260	1.293	1.220	1.347	1.482	1.500	1.894	1.947
2	<i>International Journal of Heat and Fluid Flow</i>	0.436	0.511	0.968	1.103	1.052	0.988	1.085	1.391	1.283	1.335	1.498
3	<i>International Journal of Multiphase Flow</i>	0.870	0.606	1.382	1.210	1.289	0.383	1.306	1.274	1.137	1.497	1.514
4	<i>International Journal of Thermal Sciences</i>	—	0.169	0.436	0.497	0.574	0.6	0.738	0.991	1.048	1.683	1.770
5	<i>International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow</i>	0.337	0.292	0.634	0.545	0.584	0.358	0.436	0.478	0.304	0.685	0.790
6	<i>Int. Communications in Heat and Mass Transfer</i>	0.286	0.293	0.415	0.288	0.427	0.441	0.489	0.708	0.945	1.332	1.189
7	<i>Numerical Heat Transfer, Part A, Applications</i>	0.352	0.354	0.850	0.863	0.914	0.524	0.839	0.936	1.325	1.119	1.117
8	<i>Numerical Heat Transfer, Part B, Fundamentals</i>	0.776	0.511	1.033	0.709	1.052	0.598	0.833	0.913	1.043	1.282	1.238
9	<i>Journal of Enhanced Heat Transfer</i>	0.306	0.308	0.906	0.806	0.635	0.556	0.254	0.25	0.298	0.438	0.314
10	<i>Journal of Heat Transfer - Transactions of the ASME</i>	0.606	0.472	1.059	0.373	1.252	0.731	0.776	0.886	1.202	1.421	0.959
11	<i>Journal of Thermophysics and Heat Transfer</i>	0.538	0.549	0.881	1.052	0.844	0.551	0.665	0.805	0.805	0.647	0.687
12	<i>Experimental Heat Transfer</i>	0.250	0.286	0.780	0.410	0.278	0.333	0.343	0.361	0.526	0.535	0.488
13	<i>Experimental Thermal and Fluid Science</i>	0.272	0.211	0.560	0.685	0.492	0.813	0.717	0.894	0.774	1.037	1.234
14	<i>Microscale Thermophysical Engineering</i>	1.208	1.000	1.162	1.405	1.405	0.783	0.941	0.962	1.417 (0.538)	1.000	1.900
15	<i>Applied Thermal Engineering</i>	0.276	0.330	0.476	0.493	0.675	0.596	0.777	0.814	0.868	1.349	1.922
16	<i>Heat and Mass Transfer</i>	0.305	0.237	0.613	0.477	0.574	0.368	0.253	0.343	0.485	0.873	0.786
17	<i>Heat Transfer Engineering</i>	0.283	0.393	0.620	0.874	0.531	0.632	0.495	0.71	0.776	0.792	0.841

注:2006 年以后出版的 *Microscale Thermophysical Engineering* 已更名为 *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, () 中及 2008 年以后的结果是按新名检索得到的。

表 4.2 17 种主要刊物前 10 名国家和地区论文数比较(2005 年 1 月~2010 年 12 月)

排名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
国家(地区)	美国	中国	印度	中国台湾	法国	加拿大	日本	韩国	英国	意大利
论文数	3390	1814	1094	979	890	776	729	717	554	551
比例/%	22.1	11.9	7.1	6.4	5.8	5.1	4.8	4.7	3.6	3.6

注: 上述所列中国论文数量仅包括大陆, 按照 5 年总数进行计算。

表 4.3 中国内地在 17 种主要刊物上的论文数统计 (2005 年 1 月~2010 年 12 月)

序号	刊物名称	论文总数	中国内地 论文数量	比例/%
1	<i>International Journal of Heat and Mass Transfer</i>	3281	373	11.4
2	<i>International Journal of Heat and Fluid Flow</i>	1009	47	4.7
3	<i>International Journal of Multiphase Flow</i>	522	43	8.2
4	<i>International Journal of Thermal Sciences</i>	1036	124	12.0
5	<i>International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow</i>	293	11	3.8
6	<i>Int. Communications in Heat and Mass Transfer</i>	1005	67	6.7
7	<i>Numerical Heat Transfer, Part A, Applications</i>	629	59	9.4
8	<i>Numerical Heat Transfer, Part B, Fundamentals</i>	302	40	13.3
9	<i>Journal of Enhanced Heat Transfer</i>	150	35	23.3
10	<i>Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME</i>	1234	61	5.2
11	<i>Journal of Thermophysics and Heat Transfer</i>	594	42	7.1
12	<i>Experimental Heat Transfer</i>	121	14	11.6
13	<i>Experimental Thermal and Fluid Science</i>	750	58	7.7
14	<i>Microscale Thermophysical Engineering</i>	122	15	12.3
15	<i>Applied Thermal Engineering</i>	1918	364	19.0
16	<i>Heat and Mass Transfer</i>	777	109	14.0
17	<i>Heat Transfer Engineering</i>	1565	81	5.2

表 4.4 中国内地在 17 种主要刊物上历年论文发表总数变化情况(2005 年 1 月~2010 年 12 月)

年份	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年
篇数	164	184	269	307	340	550
比例/%	8.4	9	11.7	12.6	13.1	19.9

4.3 研究内容与科学问题

依据传热传质学的总体任务方向、需求和原始驱动力,即社会经济发展产生的新需求、高科技迅速崛起衍生出的新学科方向、极端条件和结构条件复杂化创新的学科内涵延伸、生态环境压力赋予的新机遇、认识和探求事物本源微观化的必然趋势、培养造就人才应具备新知识体系和崭新科学理念的迫切性等,结合我国科学和社会发展的现实情况,拟从以下几个方面考虑相关的学科方向和研究领域:

(1) 以学科领域合理布局、奠定长期发展基础和整体水平提高为目标,重点加强传热传质的学科基础,突出基础创新研究(包括经典内涵基础及基础创新探索研究);重视变革性研究,鼓励大胆探索。

(2) 兼顾国际学术交叉前沿,密切围绕国家需求的重大创新技术基础研究,拓展围绕传热传质发展的学科基础内涵和研究领域,特别要注重从现代高新技术、经济发展急需的实际应用中凝练传热传质基础科学问题,使学科发展、研究与应用服务融入到科学技术和经济建设的主流。

(3) 通过引进新思想、新观念和科学技术新进展,以延伸和充实学科内涵,开拓应用领域,注入发展的生机和活力;鼓励对学科长期发展立意新颖且有重要学术影响、具有鲜明探索性以及针对薄弱基础环节的播种类型研究。

(4) 应强化针对培养和造就创新人才、具有自由探索的研究。

4.3.1 研究内容

传热传质学的研究内容依然围绕着因温度差所引起的能量传递过程、因物质组分浓度差异而伴随发生的物质迁移现象,以及相关的技术应用这一根本性主题展开,着重在确定一定条件下的传热传质速率及其控制,寻求传热强化和削弱的技术途径,朝着传热分析细微化和传热计算精确化,包括发现新的影响因素及其作用机理的方向发展。重要的变化和不同在于,能量和质量的概念已从传统针对宏观属性的“热”、“机械能”和宏观物质等的范畴大大延伸和拓展,已涉及化学、生物、微观粒子等各种能治形态和转换问题,不再拘泥于简单的能质形态,在研究传递基本现象和技术应用中,既考虑宏观微观过程强烈耦合作用的能质效应,又涉及物质本源的微观能质一致性。相应地,科学研究的走向显然也会发生着演化,具体可归结为考虑多现象与过程复杂(或特殊)同耦合条件下传递现象和过程特性的再认识、经典传热传质基础理论的深化;新现象发现、新规律揭示和内涵拓展更多趋向于能质传递新驱动力和微观机理的探究;技术理论和应用

更加务实地注重应用现代科学前沿成果,与高新科技形成广泛交叉,集中攻克重大科技发展关键。

1. 基础理论

基础理论方面的研究,延续了温度差所引起的热能传递、物质组分浓度差异引发物质迁移的传统范畴,但在两个方面突显出研究内容的新变化,引进现代科学理论成果的微观机理再认识;考虑多种与特殊内外部条件的复杂耦合现象和强非线性非平衡作用过程,探讨基本现象的变异和经典理论的修正。实际上,因为这两方面的深化和创新,也势必诱导出跨越传统传热传质定义的研究内容。除此之外,传统意义上尚待深入和细化的工作,仍然还是学科的基本内容,生产实际应用、尤其传统工业领域同样迫切需要。

2. 应用基础与技术

传热传质速率控制,尤其以寻求强化和削弱途径为核心的热质传递管理技术,特别是量大面广的换热器理论与技术,还将持续占据传统应用基础与技术研究的主导地位,不断要求创新理论,朝着传热分析细微化和传热计算精确化,包括发现新的影响因数及其作用机理,以有利于实际生产需求,尤其适合我国技术提升、发展资源节约、生态协调型的经济建设方针。这些研究包含了传热传质的三种基本形式、各种多场多相多组分多过程多因素耦合传递现象。

3. 基础理论的崭新开拓

基础理论的开拓源于能量和质量概念的延伸和拓展,研究范围不再局限于简单的能质状态,更加迫切的研究在于考虑微观与宏观耦合作用的能质效应以及对于微观能质一致性的探索。必然地,各过程和因素之间的强非线性和非平衡作用、揭示新的传递驱动势(或驱动力)成为基础创新的切入点。像生态环境、生物体(介质)内的能量和质量传递,就有异于经典理论所考虑的范畴,需要新的本构方程加以描述;新的微细能质转换系统,已然融合能与质的概念,传递现象认识和规律研究自是需要新的途径;微小时空尺度和纳米科技中展现的特殊局部与界面现象,早为人们所关注,所呈现出的非连续、非均匀、非光滑、强耦合、甚至竞争性传递过程特性,充满了神秘的色彩。这些都富有挑战性,正在成为热点研究内容。

4. 交叉学科与高科技应用传递现象

如前所述,传热传质学科正与诸多的学科和技术领域,尤其与高科技发展形

成广泛的交叉, 衍生的新课题新方向层出不穷, 使传热传质学的内涵也不断得到丰富。除前已讨论的外, 未来应该还会有更为广阔的天地, 高科技中的技术应用和传热传质本身的创新高技术, 更是备受研究和工程技术人员青睐。

5. 输运性质和功能材料与介质

随着新的学科发展和应用需求, 与传热传质研究和技术应用相关的热物理性质, 尤其是输运性质越来越重要, 而这些性质的研究本身也是传热传质研究的重要内容。除新材料不断被引进应用到传热传质技术中外, 依据传热传质理论和需求发展新的功能材料和介质, 在学科发展和研究中同样占据着显赫的地位, 会成为新的方向。

6. 研究方法和技术手段

任何一个学科的发展和研究, 无论是理论研究方法、分析手段, 还是实验与测试技术, 都属研究内容中必不可少的组成部分。

4.3.2 科学问题

传热传质学内容可总体性概括为, 探究和认识传递过程中的基本现象、规律, 发展基础技术理论并应用于解决实际工艺技术问题、保障系统和过程的运行安全等; 与现代产业和高科技的发展紧密交叉, 诱导出诸多全新的物理现象和概念, 探悉在许多相关学科和高新科技领域中所扮演的重要角色, 甚至所起的关键性作用。在生物医学中, 生命与生态系统由于其特殊性, 如自主调节能力、复杂的构造体系等, 其中存在的热物理问题复杂且具有重要的社会应用价值, 这其中的关键科学问题在于在此特殊系统的物质与传递、转换的机制。

对应的主要科学问题有:

(1) 适应传热传质概念的更新和范畴延伸的微观传递物理机理认识与理论描述;

(2) 复杂和耦合过程强非线性非平衡诱发的能质效应与传递新机理;

(3) 生命生态与非经典势作用下的传递物理过程特性与机理;

(4) 认识和揭示微纳尺度和界面效应下新的传递驱动势 (力) 以及描述相应物理过程的本构方程;

(5) 微纳尺度下能质转换演化与传递基本现象、特性和理论;

(6) 新的物质储能释能、载能、输能和能质转化传递现象与理论;

(7) 创新的换热器与热管理技术应用基础理论与技术;

(8) 高新科技传热传质应用基础与技术。

4.4 近期优先领域和重点支持方向

4.4.1 支持总体考虑

“十一五”国家自然科学基金支持的优先领域和重点方向基本依据“十一五”规划报告框架,重点考虑了近中期的科学发展和社会需求,可归纳考虑的出发点为:社会经济发展产生的新需求;高科技迅速崛起衍生出的新学科方向;面向装置小型微型化与巨型化的两个极端和结构条件复杂化创新的学科内涵延伸;生态环境压力赋予的新机遇;认识和探求事物本源微观化的必然趋势;培养造就人才应具备新知识体系和崭新科学理念的迫切性。经过5年的实践,基本达到预期效果,产生了较好的效益,极大促进了学科发展和人才队伍的成长。

应该说,“十一五”规划的学科发展基金支持原则和基本框架仍然可适用于“十二五”,许多优先资助方向和领域至今还是国际学术的前沿和热点,也涵盖了基本的学术内涵和主要方向,大面的指导性意义十分明显和实用。因此,本次资助战略应根据近5年国内外形势和科学技术发展的变化,更集中瞄准新的学科前沿和技术创新的源头,做进一步的补充凝练,使基金的支持有与时俱进的新思路,重视变革性研究,逐步建立针对风险高、创新性强的研究项目的特殊评审机制,鼓励大胆探索。突出基础探索源头创新,突出创新人才培养。

除特殊的人才支持计划和专项外,基金的资助通常考虑三个主要层面,原创性探索、国民经济密切相关的基础问题研究、反映学科前沿热点或者国民经济重大需求且近期可能产生较为系统突破或有显示性成果的重点领域或方向。第三个层面主要面对重点项目或少数重大项目(计划)。自然科学基金的灵魂是支持鼓励新思想及新概念的探索,尤其支持年轻学者或者结合人才培养的创新探索项目,集中体现在青年基金和大部分面上自由申请项目上。这里特别强调新思想、新方法和创新的内容,是反映国内研究前沿和热点最直接、最具代表性的标志,也就是第一层面的支持范畴。更大范围,或者说既有一些传统领域和经济需求的探索内容,更多可能考虑应用背景以及经典理论系统的局部创新研究、需要认识和技术应用基础问题,代表了多数科技工作者和教师的科研现状,在我国基础科研和经济建设起主导作用,也是基金直接贡献与服务社会和经济建设的最大研究层面。第三个层面的资助,主要是集中优秀人才资源和财力,针对有基础有积累有可能近期突破或取得较系统成果的关键性原创基础理论探索、解决重大需求或可能取得技术突破的基础研究,也考虑有重大影响的多学科交叉项目支持,尤其鼓励有一定基础的前期探索。这一层面的基金资助除在5年计划中会提

出建议列指导性方向外,同时采用专家随时单独提出建议,经专家评审筛选列入下年度支持指南。

4.4.2 基础创新探索优先方向

基于总体支持的考虑规划了基础创新探索的优先方向,以下予以说明。

1) 以热学理论为基础的经典理论的局限与创新(微观能量载子基本属性和能量传递)

经典的傅里叶导热唯象定律已不能正确地描述诸如飞秒激光加热过程、碳纳米管等纳米材料内的热量传递等极快或极小尺度过程的规律。因此,研究飞秒/纳米时空尺度下的微观能量载子的基本属性和能量传递规律是推动热学理论发展的重要基础。

- (1) 时空尺度效应所致经典传热理论的热学基础偏差以及物理描述;
- (2) 空间和时间尺度上粒子随机统计规律失效物理机理和判据;
- (3) 经典传热理论的热学基础修正和拓展;
- (4) 粒子随机统计规律失效的理论方向和方法;
- (5) 量子化的粒子性质描述传递现象和理论;
- (6) 热学新概念及其应用;
- (7) 量子化载能粒子的基本性质和载能特征;
- (8) 载能粒子的输运规律和动力学;
- (9) 载能粒子相互作用和基本性质交换特性;
- (10) 基于粒子性质和相互作用的能质传递现象和规律;
- (11) 针对不同属性和能量转换过程的载能粒子能质传递理论;
- (12) 微尺度流体流动与传热传质;
- (13) 热电转换微能源系统中的关键热物理问题;
- (14) 生物微/纳机电系统中的热物理问题。

2) 纳米材料和微纳米器件的传递现象

纳米材料和微纳米器件可以实现高效能量转换和高通量物质输运功能。对纳米材料和微纳米器件的传递现象的研究有赖于对纳米尺度下物质和能量载子的传递规律的深刻理解,纳米尺度下基本粒子传输机制的揭示以及精确的数值模拟和描述。从量子及分子水平上揭示纳米尺度下能量和物质传递的本质规律是设计实现特殊能量及物质输运功能的纳米材料和微纳米器件的理论依据。

- (1) 纳米材料和微纳米器件中的基本量子化粒子能质传递现象的基本形态;
- (2) 纳米材料和微纳米器件中粒子能质传递形态的物理机制与描述;
- (3) 材料中能量转换、聚集和耗散的传递本质;

- (4) 纳米功能材料与流体的传递过程机理与基本传递性质;
- (5) 纳米结构内流体流动和物质选择性输运动力学行为与特征;
- (6) 纳米材料体相和微纳米器件传递规律;
- (7) 基于粒子传递现象的能质传递理论和分析方法。

3) 多空间和时间尺度界面传递现象

由于涉及界面的微纳尺度特点及各种界面效应,相变伴随的质量和热量传递过程非常复杂,经典的对流传热传质理论往往不再使用,尚存很大的探索空间。

- (1) 以粒子性质刻画的界面传递特征和物理机制;
- (2) 界面传递现象的时空尺度效应;
- (3) 界面传递基本理论和规律;
- (4) 多尺度界面的传递物理过程与模型;
- (5) 多空间和时间尺度界面传递现象基本理论和分析方法;
- (6) 多物理场耦合的强非线性传热传质问题。

4) 新型能源转换系统中的能质传递现象和过程特性

新型能源转换系统以有别于经典热功转换的热电、光热、光电、光化学、光生物、电化学、电磁光热等转换形式和过程为特征,其能质传递过程由粒子传输和相互作用主导,涉及基本粒子能级变化、光子电子转换、离子以及分子原子反应等现象,广泛应用于新型能源、电子信息、建筑环境与节能减排等领域,是传热传质领域学科发展的重要方向。

- (1) 热电转换中的粒子传递现象及对热电转换的影响;
- (2) 太阳能与物质表面相互作用的微/纳尺度热辐射传递机理;
- (3) 高效太阳能光电转换系统的微/纳尺度热辐射控制方法;
- (4) 基于微/纳尺度热辐射效应的高效太阳能光伏转换系统设计方法与应用实践;
- (5) 太阳能聚集传输的辐射特征量耦合变化机制与尺度特性;
- (6) 太阳能高温热转换的热光学特性与低损失机理;
- (7) 太阳能聚集与吸收过程中的热力耦合效应与控制机理;
- (8) 高温蓄热多尺度孔隙结构的热过程特性与控制机理;
- (9) 低成本传热蓄热材料体系构建与性能控制;
- (10) 燃料电池系统中多尺度多相多组分热质传输与电化学反应耦合传递现象;
- (11) 可持续能源和清洁燃料系统中的传热传质基础;
- (12) 温室气体控制和储存处理中的能质传递;
- (13) 其他新型能源转换利用形式中的传热传质机理;

- (14) 先进电子设备热管理的基础研究;
- (15) 化学储能的材料制备与热物理基础研究;
- (16) 建筑环境控制中的热物理基础研究。

5) 生物介质和细胞、组织结构水平上的能质传递与机理

生物传热传质是传热传质领域的新兴学科方向, 涉及人体与环境之间的能量交换, 体内的能量代谢、微纳米粒子在体内循环系统的输运, 以及与细胞之间的互相作用的机制研究, 其应用领域涉及肿瘤及心脑血管病诊断、治疗、及药物动力学和纳米安全性。

- (1) 细胞、组织、器官等内的传递机理和各层结构间的传递相互作用融合;
 - (2) 多重孔隙和组织结构的整个能质传递现象和驱动机制;
 - (3) 生物活性与传递现象的耦合作用;
 - (4) 无损测温的基础理论与技术开发;
 - (5) 生物系统与环境间的热质相互作用;
 - (6) 生物传递现象宏观建模和分析方法;
 - (7) 生物医学热技术基础;
 - (8) 生物体内有害物质内暴露途径和程度确定;
 - (9) 生物体内有害物质传递及致病机理;
 - (10) 生物体内微纳尺度物质与能量传递及相互作用机理。
- #### 6) 其他多学科交叉前沿性基础探索

4.4.3 经典内涵基础研究优先方向

根据传热传质学经典内容及主要科学问题, 可将具体的优先方向和领域可归纳为如下:

1) 导热与扩散传质

- (1) 导热和扩散传质理论的微观机理再认识和描述;
- (2) 接触热阻与界面热阻;
- (3) 具有传质界面的界面热阻和质阻;
- (4) 复杂与特殊条件导热 (热迟滞现象, 非傅里叶效应, 高频超高热流和复杂结构导热等);

(5) 复杂和特殊介质非平衡性输运性质;

(6) 传质扩散导热;

(7) 加工和工艺过程中的导热和扩散传质及其控制。

2) 基础对流传热

- (1) 复杂 (多) 驱动对流传热;

- (2) 界面与电渗驱动对流传热;
 - (3) 对外力场与转旋作用下的对流传热;
 - (4) 冲击射流与震荡流对流传热;
 - (5) 多相流动对流传热;
 - (6) 交叉混合流动与特殊条件对流传热;
 - (7) 多孔介质条件下的热质双扩散与对流传热。
- 3) 微对流传热
- (1) 界面流动与微细结构内对流传热;
 - (2) 微弱势差作用下的壁面和界面区流动与传热;
 - (3) 边壁和界面微细流动结构、传热机理和边壁与界面对流换热尺度效应;
 - (4) 微细结构内流动形态与传热机理;
 - (5) 功能流体边壁区流体结构及对传热的影响。
- 4) 相变对流传热
- (1) 复杂与特殊相互作用下的相变现象与传热;
 - (2) 非线性非平衡界面微细结构特性;
 - (3) 薄液膜稳定性与蒸发凝结特性;
 - (4) 急速和爆发性相变;
 - (5) 气泡动力特征和界面微细流动;
 - (6) 竞争性相变过程与传热;
 - (7) 滴状冷凝传热的界面多尺度现象;
 - (8) 极端条件下的凝结换热机理 (高不凝气体含量, 外场力作用等)。
- 5) 传热强化和传质强化
- (1) 创新强化技术措施和机理分析;
 - (2) 新型换热器基础理论与技术;
 - (3) 相变传热强化;
 - (4) 高能流散热技术基础;
 - (5) 热管及相关技术与理论基础;
 - (6) 微尺度换热器中的流动和传热基础研究;
 - (7) 燃气轮机叶片内部高效冷却技术;
 - (8) 高温换热设备基础理论与技术;
 - (9) 超高温气流工程应用中的传热学问题;
 - (10) 扩散和对流传质强化原理与技术。
- 6) 辐射传热
- (1) 微/纳尺度热辐射特性理论和实验技术;

- (2) 非平衡、大梯度、强偏振等极端条件下的热辐射问题;
- (3) 粒子辐射特性的理论和实验;
- (4) 以辐射为主要换热方式的热工设备的反设计理论和方法;
- (5) 多场耦合下的热辐射传递;
- (6) 复杂环境目标红外辐射特征提取和融合方法;
- (7) 辐射热物性数据库的建立和比对;
- (8) 基于矢量辐射传递的大气气溶胶粒子辐射特性反演;
- (9) 半透明材料超快凝固过程中的耦合传热问题;
- (10) 辐射致冷表征参数、评估体系与评价准则;
- (11) 辐射致冷热传导、对流换热耦合机制。

7) 生物传热传质学

- (1) 肿瘤热物理治疗中的基础热学及免疫调控机制;
- (2) 生物材料的低温冻存技术与低温损伤机理;
- (3) 生物传热传质基础理论分析与计算方法;
- (4) 生命正常与非正常状态的基本热现象的定量化和系统化研究;
- (5) 微/纳尺度生物传热传质学;
- (6) 污染物在人体中的传递和作用机理;
- (7) 激光临床手术中的多尺度传热过程;
- (8) 微/纳尺度生物传热传质学;
- (9) 污染物、药物等在人体中的传递和作用机理。

4.4.4 重点重大项目支持方向

在众多优先发展的方向中,结合目前我国国情与国际研究形势,由此筛选出国家重点重大项目支持方向,以下予以列举。

- (1) 基于能量载子能质传递的基本现象物理特征认识和创新传递理论;
- (2) 纳米材料(流体)和微纳米器件的粒子特性传递机理和传热传质理论;
- (3) 纳米体系中流体流动和物质选择性输运动力学行为与理论;
- (4) 多空间和时间尺度界面传递现象;
- (5) 多物理场耦合作用下的微纳尺度传热传质理论;
- (6) 微纳尺度生物传热传质学基础理论研究;
- (7) 生物医学技术中的基础传热传质问题;
- (8) 先进高效热工转换设备设计理论;
- (9) 可再生能源利用中的传热传质基础理论;
- (10) 热电转换过程中的高热流问题;

- (11) 大气气溶胶系统的热质输运特性;
- (12) 非平衡耦合输运过程的动理学基础研究 (传热传质、热辐射);
- (13) 高超声速条件下的热质传递;
- (14) 固体材料热物性的新理论与新方法;
- (15) 极端条件下固态物质的基本辐射热物性研究;
- (16) 能源转换与储存中的传热传质基础;
- (17) 建筑环境污染控制中的关键传质机理问题;
- (18) 建筑节能新理论与新方法;
- (19) 信息技术中的传热传质基础理论;
- (20) 传热传质过程的调控方法;
- (21) 创新传热理论和技术基础理论;
- (22) 水/气杂质净化体系中新型纳米半透膜中的物质输运理论;
- (23) 生化快速检测传感技术中的微纳尺度传热传质理论;
- (24) 新型能源转换系统中的能质传递现象和过程特性;
- (25) 微纳尺度下传热传质的测量方法与技术;
- (26) 超高温条件下能质传递及强化机理。

4.5 建 议

我国的科学技术发展取得了举世瞩目的成绩,为了保持科技领域的持续、快速进步,改进现有激励与奖励机制是非常有必要的,结合我国目前研究的现状以及科学人员的状况,现建议如下:

(1) 自然科学基金强调突出“基础”和“人才”,有必要考虑对创新性探索,尤其是青年学者提出的、甚至是有争议的课题应该有更多的包容和大胆地支持;

(2) 对第一、二个基金项目完成得好且属于创新性探索优先支持的方向,应该考虑给予至少2~3次的连续支持;

(3) 杰出青年基金的设置对我国基础研究和人才培养做出了杰出的贡献,但目前看来年龄界限已不适合我国的学术研究现状,没有能够更好地起到鼓励和支持年轻学者的作用,在某种程度上可能限制阻碍了这基金的原始目标,成为新一代学术管理人员获取资源的渠道;

(4) 基金的支持力度可以向青年基金方面做一些倾斜,给他们更多的雪中送炭;

(5) 对国际上重视、而我国有人才和学科竞争优势的热科学交叉领域的支持应落到实处,避免因资助不力造成某些重大方向的发展处于被动劣势;

(6) 希望能更好的保持基金的公开、公正和公平性,加强对评审专家良好

学术道德的引导及对评审过程的监督, 完善基金监督及评审机制, 避免不合理因素侵蚀到基金的可持续健康发展;

(7) 适当增加重点项目的立项数;

(8) 希望进一步加大实验原创性研究方面的经费投入。

参 考 文 献

- [1] 杨世铭, 陶文铨. 传热学. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] 黄素逸, 刘伟. 高等工程传热学. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [3] Tsubota T, Ohtaki M. Thermoelectric properties of Al-doped ZnO as a promising oxidematerial for high-temperature thermoelectric conversion. Journal of Materials Chemistry, 1997, 7(1): 85—90.
- [4] Lee C Y, Bhuiya M M H, Kim K J. Pool boiling heat transfer with nano-porous surface. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53: 4274—4279.
- [5] Hu M, Koblinski P. Thermal rectification at silicon-amorphous polyethylene interface. Applied Physics Letters, 2008, 92: 211908.
- [6] Yu C, Saha S. Thermal contact resistance and thermal conductivity of a carbon nanofiber. Journal of heat transfer, 2006, 128: 234.
- [7] Zhou W, Ran R, Shao Z P, et al. Synthesis of nano-particle and highly porous conducting perovskites from simple in situ sol-gel derived carbon templating process. Bulletin of Materials Science, 2010, 33: 371—376.
- [8] Revellin R, Rulliere R, Lefevre F, et al. Experimental validation of an analytical model for predicting the thermal and hydrodynamic capabilities of flat micro heat pipes. Applied Thermal Engineering, 2009, 29: 1114—1122.
- [9] 李志信, 过增元. 对流传热优化的场协同理论. 北京: 科学出版社, 2010.
- [10] Bai H, Theuerkauf J R. A coupled DEM and CFD simulation of flow field and pressure drop in fixed bed reactor with randomly packed catalyst particles. Industrial & Engineering Chemistry, 2009, 48: 4060—4074.
- [11] Huang A Y L, Huang M Y F. Optical measurements of pore geometry and fluid velocity in a bed of irregularly packed spheres. Experiments in Fluids, 2008, 45(2): 309—321.
- [12] Shan X, Schmidt D P. Study of natural convection in supercritical CO₂ cold wall reactors: Simulations and experiments. The Journal of Supercritical Fluids, 2007, 40(1): 84—92.
- [13] Lu J F, Peng X F. Bubble oscillation on thin wire during subcooled boiling. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51: 4461—4469.
- [14] Wu X M, Dai W T, Xu W F, et al. Mesoscale investigation of frost formation on a cold surface. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 31: 1043—1048.
- [15] 陶文铨. 传热与流动问题的多尺度数值模拟方法与应用. 北京: 科学出版社, 2008.

- [16] 何雅玲, 王勇, 李庆. 格子 Boltzmann 方法的理论及应用. 北京: 科学出版社, 2009.
- [17] 宣益民, 李强, 纳米流体能量传递理论与应用, 北京: 科学出版社, 2010.
- [18] Kaanta B C, Chen H, Zhang X. Effect of forced convection on thermal distribution in micro thermal conductivity detectors. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2011, 21: 045017.
- [19] 彭晓峰. 微细沸腾传递现象. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [20] Thome J R. Boiling in microchannels: A review of experiment and theory. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2004, 25(2): 128 — 139.
- [21] Asadi B, Saidi M H, Taeibi-Rahni M, et al. Computational simulation of hydrodynamic convection in rising bubble under microgravity condition. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 2009, 22: 295 — 305.
- [22] Serret D, Brutin D, Rahli O, et al. Convective boiling between 2D plates: Microgravity influence on bubble growth and detachment. *Microgravity Science and Technology*, 2010: 1 — 9.
- [23] 王如竹, 王丽伟, 吴静怡. 吸附式制冷理论与应用. 北京: 科学出版社, 2007.
- [24] Liu D L, Nazaroff W W. Modeling pollutant penetration across building envelopes. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(26): 4451 — 4462.
- [25] Li M C, Wu Y S, Tian Y W, Zhai Y C. Non thermal equilibrium model of the coupled heat and mass transfer in strong endothermic chemical reaction system of porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50: 2936 — 2943.
- [26] Rekik A A, Azais F, Dumas N, et al. A behavioral model of MEMS convective accelerometers for the evaluation of design and calibration strategies at system level. *Journal of Electronic Testing: Theory and Application*, 2011: 1 — 13.
- [27] Minutillo M, Perna A. Energy analysis of a residential combined heat and power system based on a proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2009, 6: 0145021 — 0145025.
- [28] Quinn R D, Lgong L. A method for calculating transient surface temperatures and surface heating rates for high-speed aircraft. Citeseer, 2000, NASA/TP-2000-209034.
- [29] Wright S E, Scott D S, Haddow J B, et al. On the entropy of radiative heat transfer in engineering thermodynamics. *International Journal of Engineering Sciences*, 2001, 39: 1691 — 1706.
- [30] Caldas M, Semiao V. Entropy generation through radiative transfer in participating media: analysis and numerical computation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2005, 96: 423 — 437.
- [31] Liu L H, Chu S X. On the entropy generation formula of radiation heat transfer process. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2006, 128: 504 — 506.

- [32] Liu L H, Chu S X. Verification of numerical simulation method for entropy generation of radiation heat transfer in semitransparent medium. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2007, 103: 43 — 56.
- [33] Liu L H, Chu S X. Radiative exergy transfer equation. *AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2007, 21 (4): 819 — 822.
- [34] Zhang Z M, Basu S. Entropy flow and generation in radiative transfer between surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50: 702 — 712.
- [35] Gupta S, Farmer J. Multiwalled carbon nanotubes and dispersed nanodiamond novel hybrids: Microscopic structure evolution, physical properties, and radiation resilience. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109: 014314.
- [36] Gall J L, Oliver M, Greffet J J. Experimental and theoretical study of reflection and coherent thermal emission by a SiC grating supporting a surface-phonon polariton. *Physical Review B*, 1997, 55: 10105 — 10114.
- [37] Zhang Z M, Fu C J, Zhu Q Z. Optical and thermal radiative properties of semiconductors related to micro/nanotechnology. *Advances in Heat Transfer*, 2003, 37: 179 — 296.
- [38] Laroche M, Carminati R, Greffet J J. Coherent thermal antenna using a photonic crystal slab. *Physics Review Letters*, 2006, 96: 123903.
- [39] Chan D L C, Soljaccaronicacute M, Joannopoulos J D. Direct calculation of thermal emission for three-dimensionally periodic photonic crystal slabs. *Physical Review E*, 2006, 74(3): 036615.
- [40] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens. *Physics Review Letters*, 2000, 85: 3966 — 3969.
- [41] Kong J A, Wu B I, Zhang Y. Lateral displacement of a gaussian beam reflected from a grounded slab with negative permittivity and permeability. *Applied Physics Letters*, 2002, 80: 2084 — 2086.
- [42] Lamet J-M, Riviere P, Perrin M Y, et al. Narrow-band model for nonequilibrium air plasma radiation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, 111(1): 87 — 104.
- [43] Rond C, Boubert P, Félio J M, et al. Nonequilibrium radiation behind a strong shock wave in CO₂-N₂. *Chemical Physics*, 2007, 340(1-3): 93 — 104.
- [44] Jean M L, Yacine B, Philippe R, et al. Radiative transfer in gases under thermal and chemical nonequilibrium conditions: Application to earth atmospheric re-entry. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2008, 109(2): 235 — 244.
- [45] Bansal A, Modest M F, Levin D A. Multi-scale k-distribution model for gas mixtures in hypersonic nonequilibrium flows. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, 112(7): 1213 — 1221.

- [46] André F, Vaillon R, Galizzi C, Guo H, et al. A multi-spectral reordering technique for the full spectrum SLMB modeling of radiative heat transfer in nonuniform gaseous mixtures. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, 112 (3): 394 — 411.
- [47] Burdakov V P, Baranovsky S I, Klimov A I, et al. Improvement perspectives of aerodynamic and thrust-energetic parameters of hypersonic aircraft and engines when using algorithmic discharges and plasmoid formations. *Acta Astronautica*, 1998, 43(1-2): 31 — 34.
- [48] Billaud Y, Kaiss A, Consalvi J L, et al. Monte Carlo estimation of thermal radiation from wildland fires. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, 50(1): 2 — 11.
- [49] 谈和平. 红外辐射特性与传输的数值计算: 计算热辐射学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- [50] Mahulikar S P, Sonawane H R, Rao G A. Infrared signature studies of aerospace vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 2007, 43(7-8): 218 — 245.
- [51] 刘伟, 范爱武, 黄晓明. 多孔介质传热传质理论与应用. 北京: 科学出版社, 2006.
- [52] Ko K H, Anand N K. Use of porous baffles to enhance heat transfer in a rectangular channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46: 4191 — 4199.
- [53] 刘林华, 赵军明, 谈和平. 辐射传递方程数值模拟的有限元和谱元法. 北京: 科学出版社, 2008.
- [54] Wang L, Haworth D C, Turns S R, et al. Interactions among soot, thermal radiation, and NO_x emissions in oxygen-enriched turbulent nonpremixed flames: A computational fluid dynamics modeling study. *Combustion and Flame*, 2005, 141(1-2): 170 — 179.
- [55] Tang S T, Chernovsky M K, Im H G, et al. A computational study of spherical diffusion flames in microgravity with gas radiation Part I: Model development and validation. *Combustion and Flame*, 2010, 157(1): 118 — 126.
- [56] Lin Y C. Special section guest editorial: Theory and practice of MEMS, NEMS, and MOEMS. *Journal of Micro/ Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2011, 10 (1): 011501.
- [57] Wang Q Y. Femtosecond laser technique and its relative subjects. *Zhongguo Jiguang/Chinese Journal of Lasers*, 1994: 418 — 420.
- [58] Beaucamp-Ricard C, Dubois L, Vaucher S, et al. Temperature measurement by microwave radiometry: Application to microwave sintering. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(5): 1712 — 1719.
- [59] Quesson B, Zwart J A. Magnetic resonance temperature imaging for guidance of thermotherapy. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 2000, 12(4): 525 — 533.
- [60] Ihara I, Takahashi M. A new method for internal temperature profile measurement by ultrasound. *IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference*, 2007, 1-5: 646 — 650.

- [61] Arabi K, Kaminska B. Integrated temperature sensors for on-line thermal monitoring of micro-electronic structures. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1998, 12(1): 93 — 99.
- [62] Smith C R, Sabatino D R, Praisner T J. Temperature sensing with thermochromic liquid crystals. *Experiments in Fluids*, 2001, 30: 190 — 201.
- [63] Joachimsthaler A A, Zimmermann I, Heiderhoff G R, et al. SEM/SThM-Hybrid-System: A new tool for advanced thermal analysis of electronic devices. *Conference Proceedings from the International Symposium for Testing and Failure Analysis*, 2002: 3 — 7.
- [64] Abuelmaatti M T. Improved analysis of implicit RMS detectors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(3): 502 — 505.
- [65] Nomura O Y, Teijiro C T, Kazuki N. Measurement of mass transfer in microreactors. *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 2009, 35: 633 — 638.
- [66] Narasimhan A, Jha K K, Gopal L. Transient simulations of heat transfer in human eye undergoing laser surgery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53: 482 — 490.
- [67] Arata H F, Rondelez Y. Temperature alternation by an on-chip microheater to reveal enzymatic activity of β -galactosidase at high temperatures. *Analytical Chemistry*, 2005, 77(15): 4810 — 4814.
- [68] Hayek S S, Chen C J, Haik Y S, et al. Analysis of heat generation through electromagnetic energy conversion for magnetic hyperthermia cancer treatment. *American Society of Mechanical Engineers, Materials Division (Publication) MD*, 2006, *Proceedings of 2006 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2006-Materials*.
- [69] Koizumi S. UCST behavior observed for a binary polymer mixture of polystyrene/ poly (vinyl methyl ether) (PS/PVME) with a PS rich asymmetric composition as a result of dynamic asymmetry & imbalanced local stress, viscoelastic phase separation, and pinning by vitrification. *Soft Matter*, 2011, 7(8): 3984 — 3992.
- [70] O'Donovan T S, Atmane M A, Murray D B. Induced heat transfer from human skin: Its relationship to blood perfusion in the tissue. *Computational Studies*, 2002, 4: 493 — 501.
- [71] Wang Z F. The research status of solar thermal power technologies in China. *Proceeding of 13th International Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Technologies*, Seville, Spain, 2006.
- [72] Shuai Y, Xia X L, Tan H P. Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems. *Solar Energy*, 2008, 82: 13 — 21.
- [73] He Y L, Xiao J, Cheng Z D, et al. A MCRT and FVM coupled simulation method for energy conversion process in parabolic trough solar collect. *Renewable Energy*, 2010, 36: 976 — 985.

- [74] Tian X, Liao Q, Liu W, et al. Photo hydrogen production rate of a PVA-boric acid gel granule containing immobilized photosynthetic bacteria cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34: 4708 — 4717.
- [75] Peng Q, Wei X L, Ding J, et al. High temperature thermal stability of molten salts materials. *International Journal of Energy Research*, 2008, 32: 1167 — 1174.
- [76] Lu J F, Ding J, Yang J P. Solidification and melting behaviors and characteristics of molten salt in cold filling pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53: 1628 — 1635.
- [77] Alfano M, Pagnotta L, Pantano M F. A review of patented works on the mechanical characterization of materials at micro-and nano-scale. *Recent Patents on Nanotechnology*, 2011, 5(1): 37 — 45.
- [78] Thamdrup L H, Larsen N B, Kristensen A. Light-induced local heating for thermophoretic manipulation of DNA in polymer micro-And nanochannels. *Nano Letters*, 2010, 10(3): 826 — 832.
- [79] Bouhrara M, Clerjon S, Damez J L. Dynamic MRI and thermal simulation to interpret deformation and water transfer in meat during heating. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(4): 1229 — 1235.
- [80] Svensson A, Ripsweden J, Rück A, et al. Heart rate variability and heat sensation during CT coronary angiography: Low-osmolar versus iso-osmolar contrast media. *Acta Radiologica*, 2010, 51(7): 722 — 726.

第5章 燃 烧 学

5.1 学科内涵、学术意义与应用背景

燃烧是指燃料与氧化剂发生快速化学反应,并伴有发光发热的现象,是化学反应、流动、传热传质并存、相互作用的复杂的物理化学现象。燃烧现象涉及很多领域,如热力学现象、传热传质现象、流动现象、多相流问题等,在此基础上伴有复杂的化学反应动力学过程,并涉及其他多门学科。燃烧学是研究着火、熄火、燃烧过程和机理的学科,其研究内涵通常包括燃烧过程热力学,热力循环,燃烧反应动力学,着火和熄火理论,预混合燃烧,扩散燃烧,气体、液体和固体燃料燃烧,超音速燃烧,爆震燃烧,微尺度燃烧,微重力燃烧,以及燃烧诊断等。具体对象涉及锅炉燃烧、发动机燃烧、推进剂燃烧、火灾和一些特殊特定装置中的燃烧等。

燃烧学仍然是一门正在不断发展的学科,在能源、交通、航空航天、环境工程和火灾防治等方面都提出了许多有待解决的燃烧学重大问题,如高强度燃烧、低品位燃料燃烧、煤浆(油-煤,水-煤,油-水-煤等)燃烧、流化床燃烧、氧/燃料燃烧(oxy-fuel combustion)、生物质燃料燃烧、内燃机高效低污染燃烧、航空发动机燃烧、特种发动机燃烧、催化燃烧、燃烧污染物排放和控制、火灾基本规律和防治、燃烧先进诊断技术等。燃烧学的进一步发展将会与湍流理论、多相流体力学、传热学、燃料合成与制备、复杂反应的化学动力学等学科的发展相互渗透、相互促进。同时,随着计算机技术和计算方法的发展,燃烧过程数值模拟将向多参数耦合和直接数值模拟方向发展。燃料燃烧化学反应动力学是认识燃烧过程本质的一条重要手段和途径,随着燃料种类的多样化和燃烧污染物控制的要求,燃烧化学反应动力学也获得了迅速的发展和完善,为燃料高效利用提供了重要支撑。

目前,自然界中的燃料绝大部分仍是以燃烧的方式转换成可用能或功而被人类社会所利用,燃烧方式在今后可预见的一段时期仍将是燃料能量转化与利用的一种重要技术途径。因此,燃烧在能源高效转化和洁净利用方面将继续扮演重要的角色和发挥重要的作用。在自然界和人类活动中,燃烧这一自然现象扮演着正、反两方面的角色,通过燃料燃烧获取能量和通过抑制燃烧进行防火,从而使燃烧的研究从利用和防灾两个方面进行。

我国燃料结构目前仍是以煤为主,因此,煤的清洁燃烧和利用仍然是能源供给的主要部分。随着汽车工业的快速发展和汽车保有量的迅猛增加,石油燃料的比例不断增加,通过各种燃烧方式的气体和液体燃料高效洁净利用已成为节能和环境保护中一个越来越重要的方面。此外,CO₂ 减排也是燃料燃烧需要应对的一个问题。我国燃烧领域经过几十年的发展,形成了以若干国家重点实验室为中心的基础研究基地,以若干国家工程中心为主的技术应用研发基地,以企业为主的技术推广应用基地。我国高等院校、科研机构主要从事燃烧理论发展、燃烧基本规律和现象阐明、能源和动力装置中燃烧基础问题与污染物控制问题、燃烧化学反应动力学和燃烧诊断方法探索等方面的研究。

燃烧研究包含的基本范畴是基础燃烧理论、燃烧化学反应动力学、气液燃料燃烧、固体燃料燃烧、火灾燃烧和燃烧诊断等方面。

1. 基础燃烧理论

燃烧理论构成了燃烧学科的基础。由于燃烧现象与过程的复杂性及影响因素的多样性,燃烧理论的研究在国际上一直受到很大的重视。燃烧理论研究的主要内容有:建立并发展受流动、传热传质和化学反应相互作用控制的燃烧过程的理论描述方法和数学物理模型;寻求数学物理模型在各种条件下的数值解和在某些特定条件下的分析解,揭示各种燃烧现象和过程的本质与规律;将燃烧理论模型应用于固体燃料燃烧、液体燃料燃烧、气体燃料燃烧和火灾等工程实际燃烧问题的研究中。图 5.1 是典型扩散火焰和湍流火焰图。

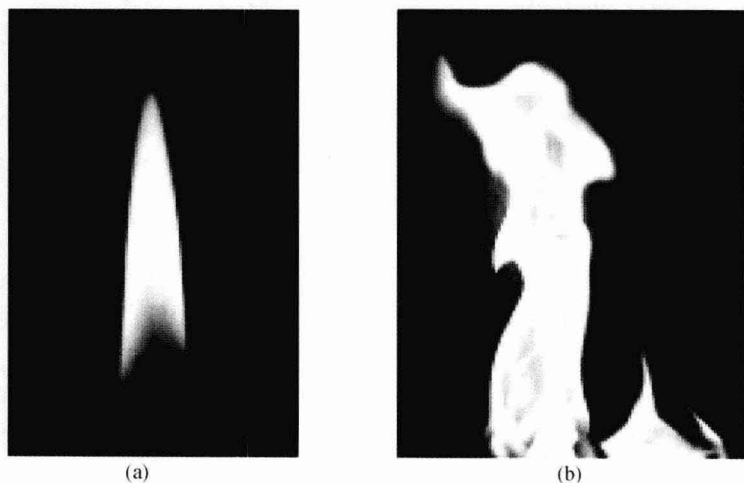


图 5.1 火焰结构图

燃烧理论的发展与燃烧技术的进步息息相关。能源动力领域的每一次重大需求,燃烧技术上的每一次重要变革,都极大地促进和推动了燃烧理论的发展。经典燃烧理论着眼于对基本燃烧现象与过程的描述,建立了着火与灭火、层流预混燃烧与扩散燃烧、单个液滴与碳粒燃烧以及层流边界层燃烧等理论。经典燃烧理论以获取分析解为基本特征,在揭示基本燃烧现象与规律上发挥了积极作用,经典燃烧理论的发展已日臻成熟。随着燃烧技术的发展和广泛应用,迫切需要建立对实际过程的复杂燃烧现象进行理论描述的方法,因此,燃烧理论逐渐从经典燃烧理论向现代燃烧理论发展。现代燃烧理论着眼于对实际复杂燃烧反应系统与过程的描述,建立了燃烧化学反应动力学、层流燃烧、湍流燃烧和多相燃烧等理论,在原子与分子水平上揭示燃烧的本质。现代燃烧理论以获取数值解为主要手段,与计算机技术的发展和應用密不可分。现代燃烧理论的基本框架已经形成,目前正在逐步发展和完善之中。现代燃烧理论在发展煤和石油能源利用技术、高效低污染燃烧技术和污染控制技术中发挥了重要的作用。

近年来,随着开发可再生能源、发展新型动力与推进装置以及二氧化碳减排的需要,发展生物质燃烧技术、超声速燃烧技术、微尺度燃烧技术、化学链燃烧技术和氧/燃料燃烧技术等受到了日益重视。这些燃烧技术的发展和應用,必将推动现代燃烧理论的进一步发展。各种燃烧技术与火灾防治技术的发展都离不开燃烧理论的指导,燃烧理论构成了发展燃烧技术与火灾防治技术的基础。将实验和理论有机地结合在一起,是发展满足各种性能要求的燃烧技术与火灾防治技术的最佳途径。随着燃烧理论的发展,人们对实际复杂燃烧现象与规律的认识与把握将会有进一步的深化和飞跃。可以预期,燃烧理论及其数值模拟方法必将在燃烧研究中扮演越来越重要的角色,在使燃烧装置与设备由传统的经验性、半经验性设计转变为基于计算机模拟的优化设计中必将发挥越来越大的作用^[1]。

2. 燃烧化学反应动力学

燃烧化学反应动力学主要是研究燃烧过程中的各种化学反应,它是燃烧学研究的主要内容之一,也是近年来国际燃烧领域最为热门的领域之一。由于经典物理理论方面的研究相对比较完善,故现阶段燃烧学基础研究的重心是燃烧化学方面的研究,即借助先进的燃烧诊断技术确定燃烧中的化学反应过程,再利用数学模型研究燃烧热力学、动力学、燃烧反应机理及反应平衡等问题。

燃烧过程中的化学反应主要包括热解、氧化和复合三大类,为了详细地了解燃烧过程,可以对这三类反应进行分别研究^[2]。例如,利用流动反应器研究燃料的热解反应和产物的复合反应,利用射流搅拌反应器研究燃料的低温氧化反应,利用层流预混或扩散火焰研究耦合的热解和高温氧化反应。通过实验结果和动力

学模拟相结合,可以得到详细的燃烧反应机理^[3]。

3. 气液燃料燃烧

气液燃料燃烧主要应用在燃烧发动机(主要指活塞式发动机、燃气轮机、航空发动机)上,也可拓展到特种燃烧发动机(超燃冲压发动机、爆震发动机)上。近100年来,特别是近20~30年来,燃烧发动机的技术突飞猛进,热效率明显提高,排放得到有效控制,燃烧基础理论的进步和燃烧控制技术的提高起到了至关重要的作用。迄今为止,燃烧发动机仍主要依靠化石类燃料,研究将集中在节能和污染物控制、替代燃料发动机、可再生能源发动机和新型燃烧方式发动机上,以延长石油资源使用期,实现发动机的燃料替代和高效清洁燃烧。显然,需要在发动机燃烧方面开展系统深入的基础研究和应用基础研究,不断为发动机技术发展提供理论支撑和技术创新源泉。

燃烧发动机是把燃料化学能通过燃烧转化为机械能的动力装置,是燃烧科学在实际工程上的应用。发动机燃烧研究涉及外源点火式、压燃式、气体燃料、燃气轮机、特种发动机等的燃烧机理和技术,目的是高效低污染地组织燃烧,提高能源转换效率,研发适应不同燃料和开发新型的燃烧装置,为机动车、农业和工程机械、船舶等提供动力源。发动机燃烧可分为多相燃烧(气液两相燃烧、气固液三相燃烧)和单相燃烧(气相燃烧),也可分为单一预混燃烧方式、单一扩散燃烧方式和预混/扩散并存的燃烧方式。发动机燃烧涉及许多基础科学,如数学、物理学、化学、力学、光学、材料、燃料学、热物理学等。燃烧污染物在大气中的扩散和运动规律涉及大气科学,对人体的危害还涉及毒理学、生命科学等。

燃烧发动机在科技、经济、社会发展中具有十分重要的地位,现代社会赖以依存的机动车、船舶、飞机、工程机械以及部分飞行器等都使用燃烧发动机作为动力,燃烧发动机的使用数量日益增加,这必将造成对能源的更大需求和环境的污染,产生更多迫切需要解决的科学问题,推动技术的发展。

4. 固体燃料燃烧

近年来,新能源在世界范围内得到了长足的发展,但是在可预见的将来,化石燃料在世界一次能源中的主导地位依然不会改变,石油、煤炭和天然气仍将“三足鼎立”。根据IEA的预测,从2007年到2030年,世界能源需求的77%是化石燃料,其中煤炭需求增长最多,占1/3以上;即便在控制地球气温升高2℃(控制大气中CO₂浓度在450ppm以内)的前景下,世界化石能源的需求也将继续增长并在2020年左右达到顶峰,此后逐渐降低;到2030年,化石燃料在全球能源需求中所占的比例仍在2/3以上。我国是世界上最大的煤炭生产和消费国,

也是为数不多的以煤炭为主要一次能源的国家之一。由于石油、天然气及水资源等的相对贫乏,煤炭在以后数十年里仍将作为我国比较现实的和不可替代的能源基础。

2008 年我国煤炭产量达 27.16 亿 t,其中约 80% 直接用于燃烧;2009 年煤炭产量达 29.6 亿 t。煤作为主要一次能源在我国“多煤贫油少气”的资源格局中短期不会改变。煤炭等化石燃料的储量有限,燃烧和利用过程会对环境造成污染。因此,高效、洁净地进行煤的燃烧与利用,即实现煤利用过程中的节能减排,是当今我国能源工业乃至国民经济可持续发展所面临的紧迫问题,而提高燃煤效率、控制燃煤污染则是解决问题的关键所在。

随着我国电力行业技术水平的提高、高能耗小机组的淘汰以及新建机组的大型化,目前我国发电企业的平均供电煤耗正逐年显著降低。据统计,我国火电机组的平均供电标准煤耗已由 2005 年的 $370\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 下降至 2009 年的 $339\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,提前超额完成《节能中长期专项规划》中关于 2010 年火电供电煤耗达 $360\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 的目标。新建的 1000MW 级超超临界机组甚至达到低于 $290\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 的世界先进水平。但是,火电机组大型化并未完全改变我国燃煤电站平均热效率偏低的现状,目前的供电煤耗水平与《节能中长期专项规划》规定的 2020 年 $320\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 的目标仍有较大的距离。

另外,燃煤污染是制约我国国民经济和社会可持续发展的一个重要因素,并已成为国际、特别是周边国家和地区关注的焦点。燃煤所释放的 SO_2 占到全国排放总量的 85%, CO_2 占到 85%, NO_x 占到 60%, 粉尘占到 70%;大量的 SO_2 、 NO_x 、 CO_2 、可吸入颗粒物和有毒重金属的排放在我国已形成极大的危害,其污染问题已引起高度重视。“十一五”以来,我国已投入了大量的人力物力进行燃煤污染防治,如火电厂加装先进的除尘、脱硫装置和低 NO_x 燃烧系统或烟气脱硝装置。但是,由于我国煤炭消耗量逐年增大、燃煤机组多,燃煤污染物的排放仍呈增加趋势,如不进一步采取强有力措施,将直接影响到 13 亿人口的健康、自然环境生态保护以及国际关系等。

化石燃料(尤其是煤)是高含碳的燃料,在燃烧过程中将排放大量 CO_2 。近年来,由化石燃料大量燃烧产生 CO_2 等温室气体的排放问题已引起国际上的高度重视,其与全球变暖又直接联系。随着全球工业化的发展,大气中的 CO_2 浓度由工业革命前的约 280ppm 上升到 2005 年的 379ppm,造成了过去 100 年内地球表面温度约上升了 0.74°C ($0.56\sim0.94^\circ\text{C}$),海平面升高约 17cm ($12\sim22\text{cm}$)^[4]。作为 CO_2 的主要排放源之一,燃煤过程中 CO_2 排放的控制越来越引起人们的关注,正逐渐成为全球洁净煤技术研究、开发和应用的主要甚至是唯一的技术推动力。

控制和减少 CO_2 等温室气体排放是目前能源乃至所有社会、经济和科学技术领域发展所必须面对的问题和挑战。虽然在不久前结束的哥本哈根气候大会上未就进一步的减排目标达成协议,但以我国为主导提出的哥本哈根协议为各方所接受,其中最重要的共识是将全球气温升高控制在 2°C 以内,体现出全人类在控制全球变暖方面的巨大决心。控制温升 2°C 的目标相当于将大气中 CO_2 浓度控制在 450ppm 以下,根据 IEA 的研究结论,为实现这一减排目标,到 2020 年,提高能源效率可贡献减排目标的 65%、可再生能源为 19%、 CO_2 捕集和封存 (CO_2 capture and sequestration, CCS) 为 3%、核能为 13%; 2030 年,提高能源效率的贡献为 57%、可再生能源为 23%、CCS 为 10%、核能为 10%。可以看出,提高化石能源的效率和 CCS 技术在其中起着重要和互补的作用。这也意味着高效、低污染甚至近零排放技术的研究开发和应用仍然是化石能源利用特别是洁净煤技术的核心。

作为以煤为主要能源的耗能大国,我国的 CO_2 排放量位居世界前列。如何有效利用煤炭资源并实现燃煤 CO_2 的减排已经成为近期热点研究课题。洁净煤技术的基础研究需要继续开展高效、低污染燃烧方面的研究以支持国家目前的节能减排目标。由于经济和技术水平的限制,目前我国还不大可能直接承担大量的 CO_2 减排任务。但作为战略目标以及满足我国能源和电力工业可持续发展的需求,还必须将 CO_2 减排和控制作为洁净煤技术基础研究的核心内容。

另外,该领域应用技术的发展与国家能源和经济发展状况是密切相关的。我国是发展中国家,虽然经济增长速度很快,但是总的水平仍较低。在可预见的很长时间内,如何协调经济发展和环境保护之间的关系,如何加快发展循环经济,建设资源节约型、环境友好型社会,洁净煤能源领域将肩负重大责任。在未来的洁净煤能源技术的发展中,既要提高能源的转换效率、减排常规污染物,也必须整合 CO_2 的减排、捕集与封存,需要考虑减排污染物与 CO_2 的经济性协调配合,形成以控制 CO_2 排放为基本出发点的未来洁净煤发电技术。

特种燃烧发动机(固体火箭发动机和固体火箭冲压发动机等)用固体推进剂在特殊环境下的燃烧也是固体燃料燃烧的重要内容。由于燃烧环境的复杂性,目前我国固体推进剂的燃烧机理和模型研究水平与国外差距较大,燃烧机理和燃烧模型的研究还不足以支撑推进剂配方的理论化调节,发动机工作中出现的燃烧不稳定问题难以从理论上准确定位。为提升我国特殊固体燃料的燃烧研究水平,固体推进剂的燃烧应该实现由粗放向精细发展,由宏观向微观转变。应借助于先进的细观燃烧手段,考虑固体推进剂燃烧火焰的三维结构特性,发展固体推进剂细观燃烧模型和数值方法,进一步提高固体推进剂的能量特性、燃烧稳定性和燃烧效率。

5. 火灾燃烧

安全是人类对生活和工作环境的基本要求,然而各种灾害却时刻威胁着人类的生活和生存环境,这其中又以火灾的发生最为频繁。

长久以来,火灾就一直是危害人民生命和财产安全并造成社会不稳定的重要原因。近20年来,我国重特大火灾事故呈现总体上升趋势,形势持续严峻,其中克拉玛依火灾(1994年,死亡323人)和洛阳东都商厦火灾(2000年,死亡309人)是近十多年来世界上单次死亡人数最多的两起火灾。2003年湖南衡阳特大火灾中建筑物坍塌,导致20名消防官兵牺牲,为我国消防史上的悲剧。2008年乌鲁木齐德汇国际广场火灾连续燃烧了68小时,直接经济损失超过5亿元,并导致了3名消防官兵牺牲。近年来我国平均每年因火灾死亡约2000余人,年均火灾次数达20余万起,年均火灾直接经济损失比20世纪90年代同期增长了近两倍。另外,高层建筑的不断增多也带来日益严重的火灾安全问题,如2009年元宵节中央电视台配楼火灾导致1名消防队员牺牲,直接经济损失1.6亿元,造成重大社会影响;2010年11月15日上海静安区高层建筑火灾更是造成58人遇难。严峻的火灾形势已严重影响我国城市经济发展和社会稳定。

火灾过程是具有复杂性本质的科学研究对象,其孕育、发生和发展包含着流动、相变、传热传质和化学反应等复杂的物理化学变化,涉及物质、动量、能量和化学组分在复杂多变的环境条件下相互作用的三维、多相、多尺度、非定常、非线性、非平衡态的动力学过程。深刻地认识火灾现象,并对火灾进行科学防治,是保障我国经济快速持续发展和建立和谐社会所迫切需要解决的重大问题之一。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》首次将公共安全列为重点领域,火灾安全是其中的重要组成部分。从公共安全各分支领域看,火灾安全是生产安全、社会安全、反恐防恐、防灾减灾、核安全、爆炸安全及大型舰船与航空航天安全等领域共有的公共安全问题,具有鲜明的跨领域与多学科交叉性。深刻认识火灾现象,大力发展火灾科学,并拓展研究火灾衍生公共灾害,实现科技防灾(减灾)目标,已成为保障我国社会经济可持续发展的重大需求,是全面构建社会主义和谐社会必须解决的重大战略问题。立足科技减轻火灾危害,将是我国火灾科学研究在今后相当长时期内的重大任务之一。

6. 燃烧诊断

在燃烧研究中,通过燃烧检测与诊断技术直接获取的实验数据是认识燃烧现象的机理和规律、发展燃烧理论的基础,是燃烧学研究的重要组成部分。燃烧诊断不同于一般的流体测量,具有高温燃烧火焰辐射、气-固或气-液两相甚至气-

液-固三相的复杂流动等特点。燃烧诊断的任务就是利用现代激光技术、光谱技术和电子信息等技术的结合,对燃烧过程的流场、温度、密度、气体成分及其浓度,颗粒物的成分、浓度、尺寸及其分布等进行定性分析和定量测量,并采用先进的数据处理和分析方法,对燃烧过程进行诊断。

5.2 国内外研究现状与发展趋势

5.2.1 基础燃烧理论

对于燃烧理论国内外已开展了大量的研究工作。目前,国际上燃烧理论研究的前沿领域和热点问题主要表现在以下方面。

1) 燃烧化学反应动力学的研究

燃烧化学反应动力学是燃烧理论的基础,它表征了燃料燃烧的基本特性。建立不同燃料的燃烧反应动力学模型是进一步从理论上对各种复杂的燃烧过程进行定量描述的前提。这方面的研究工作主要包括:

(1) 煤、生物质和各种固体可燃物的热解与燃烧反应动力学。对煤的热解与燃烧反应动力学已提出了多种理论模型,如可预测煤粒热解过程中各气体组分释放速率的官能团(FG-DVC)模型、化学逾渗热解(CPD)模型和Merrick热解模型等。对煤粒焦炭燃烧过程中涉及的氧化与还原反应也已建立了多种理论模型。对生物质热解已建立了单反应、双平行反应和官能团模型,对各种固体可燃物的热解也已建立了单反应和多平行反应模型。由于生物质和固体可燃物的多样性,对生物质和各种固体可燃物的热解及其残炭燃烧的反应动力学模型的研究仍有待进一步开展。

(2) 气体燃料燃烧的详细化学反应动力学及简化化学反应动力学。气体碳氢燃料如甲烷的燃烧往往包含上百个基元反应和几十个中间产物,可以用详细化学反应机理来描述。目前已经发展了甲烷氧化的GRI 1.2机理(涉及32个组分和175个基元反应),在此基础上发展了考虑 NO_x 生成的GRI 2.11机理(涉及49个组分和277个基元反应),以及更详细的包含丙烷和 C_2 氧化的GRI 3.0机理(涉及53个组分和325个基元反应)。对其他一些气体燃料,也已建立了或正在探讨建立详细的化学反应机理。采用详细反应机理进行计算往往存在计算量较大的问题。为了简化求解计算,将详细化学反应机理简化为多步化学反应机理的研究也受到了重视。对详细反应动力学机理进行简化的主要方法有:敏感性分析方法、准稳态假设方法、部分平衡假设方法、计算奇异摄动(CSP)方法、内在低维流形(ILDM)方法和在线自适应建表(ISAT)方法等。

(3) 炭黑生成的反应动力学。在各种碳氢燃料的燃烧和火灾过程中,常常伴随有炭黑等颗粒物的产生。火焰中炭黑的生成经历前驱物的形成、炭黑的成核、颗粒的长大和氧化等过程,涉及复杂的化学反应动力学机理。目前已建立了一些描述炭黑生成的详细的化学反应机理和简化的化学反应机理。炭黑生成的详细的化学反应机理包括从炭黑前驱物形成到炭黑成核、长大和氧化的详细反应机理,如 Frenklach 等提出的包含燃料高温分解、前驱物多环芳烃(PAH)的生成、平面长大和凝聚成球形颗粒,以及颗粒的长大和氧化的详细反应机理等。炭黑生成的简化的化学反应机理主要由炭黑成核、颗粒长大和氧化的多步反应机理和炭黑前驱物生成的多步或详细反应机理构成,如描述炭黑质量分数(或体积分数)和数密度演化的各种双方程模型等。目前,炭黑形成机理还不够成熟,所涉及的复杂化学反应机理和理论描述仍有待进一步的研究。

2) 层流燃烧的研究

一些燃烧反应装置内的燃烧呈现为层流燃烧,层流燃烧也是在较为理想状况下的燃烧。对层流燃烧开展研究,可以揭示火焰本身的结构、特性和规律。国际上对各种条件下的层流燃烧研究,包括层流扩散燃烧、层流预混燃烧和层流部分预混燃烧等。其中层流燃烧理论研究涉及的范围主要有:

(1) 各种层流火焰的结构和特性。在不同条件下,层流火焰呈现出不同的形状,如球形火焰、柱形火焰和片状火焰等。对这些火焰的传播速度、火焰厚度和火焰拉伸率等特性及火焰内部结构开展了研究。对不同燃料的层流预混火焰传播速度也开展了研究。

(2) 层流火焰与各种物理因素的相互作用。层流火焰与旋涡的相互作用可作为更复杂的湍流燃烧的基本单元,对此已进行了许多研究。探讨了层流火焰对旋涡应变与曲率的响应、火焰的拉伸与皱折、火焰引起的涡量产生与衰变,还探讨了流动旋转对层流火焰传播的影响等。对层流火焰与浮力的相互作用也进行了研究,探讨了浮力对火焰温度场和浓度场的影响。研究了外加磁场对层流预混火焰的作用,探讨了利用磁场对燃烧进行控制的可能性。此外,还研究了层流火焰与颗粒的相互作用,探讨了含颗粒的层流预混火焰中颗粒对层流火焰传播速度的影响。

(3) 层流火焰的振荡与不稳定性。研究了稳定或振荡的层流提升火焰的结构与特性,由贫预混火焰、富预混火焰和扩散火焰构成的层流三重火焰的结构与特性,受浮力作用的层流扩散火焰的不稳定性以及浮力对不稳定性的影响,层流火焰-旋涡相互作用时的流体动力学不稳定性等。对受拉伸作用的层流预混火焰,研究了辐射引起的火焰不稳定性。

(4) 各种极端条件下的层流火焰特性。针对碳氢燃料的层流预混火焰,研究了

在当量比超过某一临界值时的超绝热火焰温度现象。研究了在微重力条件下,接近于可燃极限的层流预混火焰的熄火特性。此外,还研究了颗粒存在对层流预混火焰可燃极限的影响,研究了颗粒存在对非预混层流火焰的热气体点火的影响等。

3) 湍流燃烧的研究

实际燃烧反应系统内的均相燃烧绝大多数为湍流燃烧,湍流燃烧是湍流-化学反应相互作用的结果。目前国际上对湍流燃烧和湍流-化学反应相互作用的理论研究异常活跃,提出并建立了多种理论模型和模拟方法,主要包括:

(1) 针对湍流扩散燃烧、湍流预混燃烧和湍流部分预混燃烧已分别开展了大量的理论与数值模拟研究;提出了多种描述湍流-复杂化学反应相互作用的理论模型^[5],如联合概率密度函数(PDF)输运方程模型、层流小火焰模型和条件矩(CMC)模型等。这方面的研究仍在进一步深入。

(2) 大涡模拟(LES)在湍流燃烧的研究中得到了较多的应用。大涡模拟可以揭示出湍流燃烧中对湍流混合起主导作用的大尺度涡的瞬态结构,还可以描述局部火焰对流场非定常性的瞬时响应。对大涡模拟中涉及的亚格子湍流燃烧模型已相继发展了尺度相似性模型、层流小火焰模型、条件矩模型、过滤密度函数(FDF)输运方程模型和线性涡模型等。这方面的工作仍在进一步进行之中。

(3) 将直接数值模拟(DNS)应用于湍流燃烧的研究。对火焰核、平面预混火焰、自动点火、衰变湍流中的燃烧、浮力驱动的射流火焰、平面射流火焰、射流提升火焰和轴对称射流火焰等开展了直接数值模拟研究^[6](见图5.2)。直接数值模拟不仅可以揭示出湍流燃烧的瞬态多尺度结构,为深入认识湍流燃烧的特点和规律提供丰富的信息,其结果还可以作为检验湍流燃烧理论模型和亚格子湍流燃烧模型的数据。

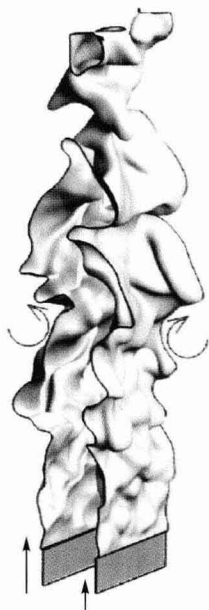


图 5.2 湍流射流火焰的直接模拟结果

4) 多相与多相流燃烧的研究

大多数实际燃烧反应系统内发生的过程均为含大量固体颗粒或液滴的多相燃烧过程。国际上对多相/多相流燃烧的理论及数值模拟研究,既涉及对颗粒或颗粒群多相燃烧特性的研究,又涉及对实际燃烧反应系统内湍流多相燃烧的研究。

它们包括:

(1) 开展对液滴、煤、焦炭、生物质颗粒多相(非均相)燃烧特性的研究,以及对金属颗粒与固体推进剂多相(非均相)燃烧特性的研究。研究了液滴的着火,微重力条件下液雾的燃烧,液雾对冲火焰,声波对液滴燃烧的影响,碳粒的非稳态燃烧等;同时对木材的热解、着火和残炭表面氧化反应也进行了研究;还研究了微纳尺度的铝颗粒的燃烧,固体推进剂的火焰特性等。这些研究对于了解多相燃烧的特点与规律,合理准确地对多相燃烧进行理论描述是很有必要的。

(2) 对湍流-颗粒运动相互作用和颗粒-颗粒相互作用的理论模型开展研究。由于循环流化床燃烧等技术的发展,对稠密颗粒多相流中颗粒之间相互作用引起的颗粒聚集、碰撞和团聚等现象的研究逐渐受到重视。在描述颗粒碰撞相互作用上,已提出了欧拉坐标系框架下的颗粒动力学模型和拉格朗日坐标系框架下的离散颗粒模型等不同的理论模型,后者包括颗粒硬球模型、颗粒软球模型和颗粒随机碰撞模型等。

(3) 大涡模拟和直接数值模拟已开始 in 液雾湍流多相燃烧的模拟中得到应用,大涡模拟在煤粉燃烧的模拟中也已开始得到应用。这为了解湍流多相燃烧的两相相互作用机理,验证湍流多相燃烧理论模型提供了详细的数据。建立在将湍流理论、多相流体力学和化学反应动力学三者有机交叉结合在一起的湍流多相燃烧理论仍处在不断地发展和完善之中。

5) 燃烧理论的应用

随着燃烧理论的发展,其应用范围也在逐渐扩大。燃烧理论及其数值模拟越来越多地应用于固体燃料燃烧、发动机燃烧和火灾等工程实际燃烧问题的研究中,在蒸汽锅炉、工业窑炉、内燃机、燃气轮机、航空发动机和火箭发动机燃烧室的研制与设计,以及各种火灾防治技术的研究与开发中发挥着越来越大的作用。例如,将湍流多相燃烧理论应用于模拟煤粉燃烧过程中灰粒在燃烧室壁面上的沉积,应用于模拟燃烧室内煤粉燃烧或煤粉与污泥煤粉混烧时飞灰的成分,研究不同燃料或燃烧器结构对富集在细飞灰上的镉(Cd)和铅(Pb)等重金属含量的影响;应用于煤粉与木屑生物质颗粒在燃烧炉内混烧的模拟;将基于详细化学反应动力学的燃烧理论应用于直接喷射均质压燃着火(homogeneous charge compression ignition, HCCI)发动机燃烧与排放的模拟;将耦合详细反应机理的联合PDF输运方程模型应用于均质压燃着火发动机燃烧的模拟,探讨湍流-化学反应相互作用对点火时间和一氧化碳/未燃碳氢化合物排放模拟结果的影响;将湍流燃烧的大涡模拟和详细反应动力学应用于带后台阶的冲压发动机燃烧室内氢气燃料从自行着火到火焰稳定过程的模拟;将基于详细反应机理的燃烧理论模型应用于有氢气横向射流和凹槽的超燃冲压发动机燃烧室内燃烧振荡的模拟;将湍

流燃烧的条件矩模型应用于室内火灾烟气中的毒性产物——一氧化碳生成的模拟；将多相燃烧模型应用于森林燃料床表面火蔓延的模拟；将燃烧理论应用于指导垃圾焚烧炉的设计等。在发展新概念燃烧技术，如微尺度燃烧、催化燃烧、燃烧合成纳米材料和超低 NO_x 燃烧等技术中，燃烧理论及其数值模拟也得到了许多应用。这些应用包括对微尺度燃烧器内甲烷-空气预混气的燃烧与火焰传播的模拟，对氢气-空气混合物湍流催化燃烧的模拟，对时间发展混合层中纳米颗粒聚合的直接模拟等。此外，燃烧理论的应用还扩展到微重力燃烧中，以探讨和获取微重力条件下燃烧或火灾发生的特点与规律。

国内在燃烧理论方面主要围绕燃烧及其污染物生成反应动力学、湍流燃烧和多相燃烧开展了研究，近年来也开始开展了层流燃烧的研究。国家自然科学基金委员会和科技部等部门对此给予了持续不断的支持，其中，国家自然科学基金委员会资助了多个燃烧理论研究的面上项目，并开始资助燃烧理论研究方面的重点项目。经过多年的努力，国内学者在多相燃烧反应动力学、湍流燃烧理论、湍流多相燃烧理论以及燃烧理论的工程应用等研究上取得了较大的进展，获得了多项有特色的创新性成果。这些成果主要有：

(1) 燃烧及其污染物生成的反应动力学研究。

在这方面，提出了煤的热解、着火、燃烧、气化及其反应动力学理论的宏观通用规律。研究了煤燃烧过程中痕量重金属元素的反应机理与排放规律、焦炭燃烧中 N_2O 的多相生成与分解机理，以及 NO_x 生成与分解的机理模型简化。采用量子化学方法从理论上计算基元化学反应的动力学与热力学参数，探讨了将量子化学从头计算理论应用于煤燃烧过程中痕量重金属元素排放的基元化学反应动力学参数与热力学参数的计算。此外，还研究了对碳氢燃料如甲烷和正庚烷等的详细化学反应动力学机理的简化，获得了多步的复杂化学反应机理；建立了林木等生物质热解的反应动力学模型；对部分芳烃和硝基甲烷等燃料的详细化学反应动力学机理进行了研究。

(2) 湍流燃烧与多相燃烧理论的研究。

在这方面，提出了描述旋流燃烧中湍流运输的新代数 Reynolds 应力、热流量与质量流量模型及其简化的显式形式，湍流-颗粒运动相互作用的颗粒湍能运输方程模型、颗粒二阶矩运输方程模型和脉动频谱颗粒随机轨道模型，以及湍流-化学反应相互作用的代数二阶矩-概率密度函数湍流燃烧模型、湍流-复杂化学反应相互作用的温度脉动简化概率密度函数湍流燃烧模型、湍流-颗粒反应相互作用的颗粒随机轨道模型。开展了湍流燃烧的大涡模拟和直接数值模拟研究、液雾湍流多相燃烧的大涡模拟和直接模拟研究，提出了二阶矩亚格子湍流燃烧模型。研究了稠密颗粒多相流中的颗粒-颗粒相互作用模型，发展了颗粒动力学模

型和离散颗粒模型,提出了颗粒双尺度二阶矩输运方程模型。在多相燃烧方面,提出了考虑碳粒表面氧化-还原反应和 CO 容积反应的移动火焰峰面模型及碳粒燃烧速率的显式表达式,研究了煤粒挥发分火焰与焦炭燃烧的相互作用。

(3) 燃烧理论的实际工程应用。

燃烧理论在发展各种高效低污染的煤粉燃烧技术中得到了较多的应用,如用于研究各种新型煤粉燃烧器、新型煤粉点火装置、再燃等 NO_x 排放控制技术。燃烧理论在发展各种内燃机的高效低污染燃烧技术中也得到了应用,如用于均质压燃着火发动机燃烧与排放过程的多维数值模拟。燃烧理论还应用于液体火箭发动机的研制,对液体火箭发动机喷雾燃烧进行模拟,预测液体火箭发动机燃烧的不稳定性,为燃烧不稳定性的控制提供依据。在各种建筑火灾和工业火灾的火蔓延、烟气运动与控制的模拟中,燃烧理论得到了越来越多的应用。燃烧理论在发展新的燃烧技术中也得到了应用,如用于研究各种微尺度燃烧装置,探讨壁面催化等的作用,用于研究超燃冲压发动机燃烧室内的超音速燃烧、研究各种多孔介质燃烧器,还用于钙基载氧体化学链煤燃烧的研究等。燃烧理论的应用范围还在继续不断扩大之中。

国内高校和研究所已形成了若干从事燃烧理论研究的团队或小组。这些团队和小组近年来发表的 SCI 等高水平论文数量不断增加,论文在 SCI 刊物上被他人引用的次数也在不断增加。近年来,国内学者在国际燃烧会议上宣读发表的论文数量也在增加,研究成果在国际上产生了一定的影响。但总的来看,国内从事燃烧理论研究的力量还是相对薄弱一些,仍未形成比较强的燃烧理论研究团队。燃烧理论的研究与国际先进水平还有相当大的差距,具体表现在:虽然已从多方面开展了湍流燃烧与多相燃烧理论的研究,但研究仍不够系统、深入;燃烧化学反应动力学研究的范围有待进一步扩大;对层流燃烧的详细理论研究刚刚起步;新概念燃烧技术的理论研究有待进一步扩展加强;燃烧理论的应用领域和范围需要进一步拓展,以更多地用于解决工程实际燃烧问题。因此,燃烧理论的研究仍有待进一步加强。

5.2.2 燃烧化学反应动力学

燃烧动力学的发展是建立在燃烧诊断技术的发展基础之上的。在数学模型发展方面,随着 20 世纪 70 年代以后计算机技术的迅猛发展,人们开始建立燃烧的数值模拟方法及数值计算方法。在过去的 20 年中,理论与模型研究在燃烧化学中扮演了越来越重要的角色^[7]。目前,与燃烧化学相关的理论计算主要集中在两个方面:一方面,对燃烧过程中某些物种的热化学数据的计算及某些重要燃烧基元反应的速率常数的计算,现在众多成熟的商用软件如 Gaussian、Molpro、

Polyrate 等为这些电子结构计算提供了便利；另一方面，利用以 CHEMKIN 等为代表的大型动力学计算软件对燃烧过程进行动力学模拟，与实验结果相对照，可以完善现有的动力学机理。在先进计算技术和方法的基础上，现阶段机理性的研究主要偏重于污染物形成机理的探索和复杂机理的简化，从而能够对燃烧过程中反应物的消耗、主要产物以及有害污染物的形成进行预测，并有助于将燃烧学基础研究领域的理论成果转化到实际应用中。

基于上述的方法，当前燃烧化学动力学的理论计算研究主要集中在两大方向上，即多环芳烃与颗粒物的形成机理和含氮燃烧化学体系。近年来，大量的理论计算工作表明，不含芳烃燃料的燃烧过程中芳环乃至颗粒物的形成源于自由基的复合反应，如苯环的形成与炔丙基的复合反应息息相关，而在环生长形成大质量多环芳烃和颗粒物的过程中，小的自由基和活泼的中间产物也占有重要地位。含氮燃烧化学体系的研究成果表现在详细化学机理的建立上，尤其是 Miller 等在最近 20 年间的理论研究涵盖了一系列的含氮燃料燃烧现象，包括激发型 NO 的生成（prompt NO）、燃料束缚氮导致的 NO_x 生成、热 NO_x 解离等，为理解含氮燃烧化学动力学提供了帮助。

经过 50 余年的发展，我国在燃烧基础研究领域取得了长足的进步，如在燃烧物理研究方面已经建立了完整的学科体系，并服务于实际工程研究中。而随着探测手段的完善和对机理研究的重视，我国的燃烧化学研究也处于快速发展之中。详细介绍如下：

1) 碳氢化合物燃料的化学动力学研究

燃烧化学动力学的发展始于 20 世纪 80 年代，当时受限于实验手段、理论水平以及计算能力的桎梏，研究范围多限于部分 C1 至 C4 小分子气态燃料。近年来，随着实验技术和计算能力的提高，研究者逐渐将目光转向大分子液态燃料，尤其是长链烷烃和芳香烃类燃料，主要是为了研究复杂实用燃料的简化替代燃料动力学机理和多环芳烃以及颗粒物的形成机理。但在芳香烃燃料的燃烧过程中，燃料本身存在苯环结构，生成多环芳烃（如萘等）的反应成为颗粒物生成的速控步，因此，芳香烃燃料的颗粒物生成趋势较高，有利于研究颗粒物生成机理。

得益于近来理论研究和模拟研究的发展，单环芳烃机理涉及的大部分反应均有文献速率常数，因此，我国研究人员开始对单环芳烃的贫燃、当量和富燃的火焰进行系统的动力学研究。目前已经完成了苯和甲苯的热解动力学机理的发展，以及甲苯和乙基苯燃烧动力学机理的发展，得到了与实验结果吻合较好的模拟结果。值得注意的是，无论是对于热解机理还是燃烧机理，在发展过程中均确保将所有机理统一在一起，最终得到完善的单环芳烃热解和燃烧机理。对于多环芳烃生长过程的生成速率分析显示，现有 HACA 通道的步骤较烦琐，致使其速率过

低,难以影响大多数多环芳烃的形成,而与之相反,共轭稳态自由基加成机理的速率常数比较大,且相应的自由基反应物(炔丙基、环戊二烯基、苄基和茛基等)由于具有稳定结构,浓度也很高,故往往对相关多环芳烃的生成具有较大的贡献。另外,发现在单环芳烃火焰中,部分多环芳烃的二氯化物的脱氢反应很有可能对这些多环芳烃的形成具有显著的影响。

2) 含氮燃料的化学动力学研究

含氮燃料的燃烧模型建立在相关燃烧实验的基础上,这些实验或直接采用含氮燃料,或采用碳氢化合物与含氮化合物混合形成的燃料,目的是从不同的角度探究这些火焰中碳氢中间产物与含氮中间产物的相互作用,从而通过再燃过程来减少氮氧化物的排放,使之主要转化成无害的氮气。需要指出的是,由于含氮化合物反应体系的复杂性,目前还有很多基本反应需要从理论上和实验上进一步完善。利用新的燃烧诊断技术,可以探测到含氮燃料火焰中一些重要的自由基和中间产物,其中包括再燃过程中起重要作用的物种。因此,详细和系统地研究一些模型燃料的燃烧,结合实验结果和已有的理论基础建立和验证新的燃烧模型,是含氮燃料基础研究的热点和前沿,也是国际相关研究领域发展的重要方向。

如前所述,目前对含氮燃烧化学体系的研究着重于对燃料型 NO 机理的研究,因此,国内研究人员系统地从实验和动力学模拟两个方面对不同含氮燃料燃烧过程进行了研究。在 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{NH}_3$ 体系(燃烧当量为 1.0, NH_3/CH_4 摩尔比从 0 到 1.0 一共 11 个火焰)中,提出了一个由 84 个物种、703 个基元反应组成的燃烧动力学模型,该模型首次将碳氢燃料与 NH_3 的耦合作用进行了详细的描述,模型预测值与实验值很好地吻合。在硝基甲烷体系中,国内研究人员系统地研究了硝基甲烷的火焰结构,鉴别了很多前人未观测到的中间体,得到了所有物种的空间分布曲线;基于前人理论以及本次实验研究的基础上,提出了一个包括 68 个物种 307 个反应的燃烧模型,而且模拟结果与实验值符合得很好。

3) 固体推进剂的化学动力学研究

固体推进剂的燃烧模型建立在相关燃烧实验的基础上。通过大量的热解和燃烧实验,从不同角度研究固体推进剂凝相和气相反应机理,研究各组分的相互作用机理,摸清固体推进剂燃烧规律,提高其燃烧效率。目前对固体推进剂的热解与燃烧反应动力学已提出了多种理论模型,如双基推进剂的多区燃烧模型、复合推进剂的多火焰(BDP)模型和小系统(PEM)模型等。但是固体推进剂本身组分多,反应方式和反应机理复杂,还有很多基本反应需要从理论上和实验上进一步完善。利用新的燃烧诊断技术,进一步详细和系统地研究其一些燃烧规律,结合实验结果和已有的理论基础,建立和验证新的细观燃烧模型,是固体推进剂基础研究的热点和前沿,也是国际相关研究领域发展的重要方向。

尽管我国的燃烧化学研究经过长远发展取得了一些成绩,但是,我国的燃烧化学动力学研究领域与国际上相关领域之间相比还有相当大的差距,具体表现为研究队伍有待壮大、研究体系尚未完善以及研究方向不够全面等。我国的燃烧化学研究主要立足于工程应用领域,故而研究人员绝大部分具有工科背景,但由于燃烧过程是一个非常复杂的化学反应体系,故也需要大量具有化学背景的研究人员参与进来。为完成上述目标,在本领域中需要有效利用现有资源,加强合作与交流,重视燃烧化学的研究,增强实验研究与理论研究之间的联系,为燃烧实际应用领域提供指导依据,从而满足我国能源和环境安全的战略需求。具体表现在:在已有宏观研究(如温度、压力的测量)的基础上综合利用各种燃烧诊断技术以兼顾微观研究,如测量燃烧过程中间体的种类、浓度、空间分布以及时间分辨等;密切结合理论模型的研究,深入探索碳氢化合物燃料的燃烧动力学,揭示多环芳烃以及炭黑气溶胶的形成机理;针对我国以煤炭为主体的能源消费结构,对含氮、含硫类燃料的燃烧过程进行细致的研究,全面探测其中间产物并据此推断 NO_x 、 SO_x 等污染物的形成机理;同时还需要积极发展现有燃烧诊断技术,扩展它们的应用范围。最近,生物质燃料的燃烧是国际研究的热点,其动力学机理的研究刚刚起步,需要引起国内学者的重视。此外,需要加大对本领域的资金和人才投入,培养一批优秀的研究团队,在自主研发的基础上,适当引进国外的先进技术,完善我国燃烧学基础研究体系,争取在未来的10年间达到国际先进水平,以满足我国《国民经济和社会发展“十一五”规划纲要》中所提出的建设环境友好型社会的要求。

5.2.3 气液燃料燃烧

1. 内燃机燃烧

内燃机消耗了将近2/3的石油资源,产生的 CO_2 排放占总 CO_2 排放的1/4以上,并且60%以上的城市大气污染物来源于汽车内燃机的排放。近年来,随着我国汽车工业的快速发展和汽车保有量的迅猛增加,我国已成为世界第一大内燃机生产和消费国,2009年我国内燃机产量达到了6700万台,功率达到11.3亿kW。我国石油燃料在能源中的比例不断增加,2010年石油对外的依存度超过了50%,因此,内燃机动力燃料的高效洁净利用已成为节能和环境保护中一个越来越重要的方面,成为影响我国经济和社会可持续发展与环境保护的一个重要环节。

我国内燃机技术随着改革开放近年来得到了迅速的发展,在我国生产的国外品牌汽车的油耗指标达到先进水平,部分国内发动机油耗指标还有进一步提升的

空间。

内燃机主要指柴油机和汽油机,使用的燃料有柴油、汽油和代用燃料。柴油机采用高压喷雾压燃着火燃烧方式,属于非均质扩散燃烧(见图 5.3),汽油机采用预混合气火花点火燃烧方式,是均质湍流燃烧。美国和日本两国的交通燃料主要消耗在汽油机上,欧洲采取的是大力发展柴油轿车技术,我国轿车发动机以汽油机为主,商用车以柴油机为主。

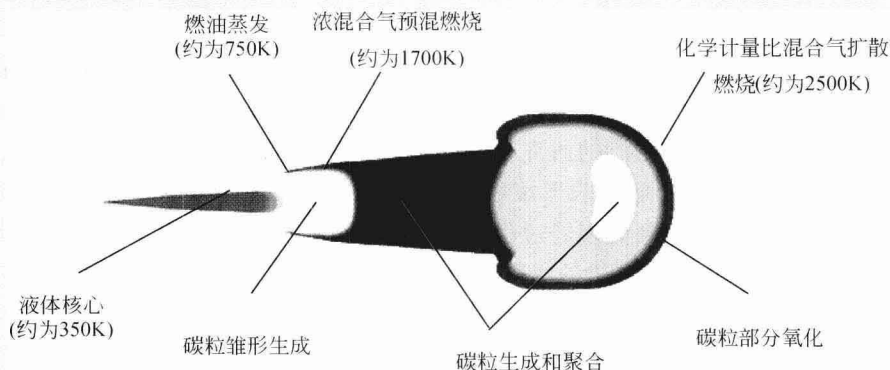


图 5.3 高温高压下液体燃料喷雾燃烧

柴油机研究重点已逐渐转移到采用高压共轨燃油供给方式的高压喷雾、高增压比高密度和废气再循环(EGR)控制的低温燃烧(LTC)柴油机上^[8]。柴油机研究工作逐渐向细节和深层次发展,更多地从燃烧火焰和浓度、燃烧中间产物、温度场的角度来解析燃烧现象;排气控制研究仍集中在 NO_x 和颗粒物上,有害小颗粒(PM2.5或纳米级颗粒)净化引起越来越多的重视;高混合速率、多段喷射、EGR控制燃烧技术已较好地解决了燃油经济性、排放和燃烧噪声之间的矛盾,并在柴油机中得到应用。

汽油机采用火花点火燃烧方式,除缸内直喷汽油机外,均采用均相混合气燃烧方式。汽油机缸内直喷化和涡轮增压是提高燃油经济性的重要途径^[9]。汽油机污染物控制研究主要集中在启动工况,快速激活尾气后处理装置上。所开展的燃烧研究集中在火核形成、火焰发展、湍流燃烧以及相关的数值模拟等方面,通过燃烧弹或快速压缩装置中的基础研究对稀混合气燃烧规律有了更深入的理解。

1) 汽油机

汽油机的发展经历了三个阶段。自汽油机发明开始至20世纪80年代为止的一百多年来,几乎所有的产品汽油机都依靠化油器来实现油气混合。自20世纪

80 年代以后,汽油进气道喷射或进气口喷射的电喷汽油机很快代替了化油器,成为汽油机的主流。电控技术的应用和排气后处理的结合大幅度降低了燃油消耗率和有害气体排放,使汽油机在节能和降低排放两方面得到收益,由于电喷燃料控制精度的提高、发动机工况控制策略的完善以及三效后处理催化装置的使用,基于进气管形成混合气的火花点火汽油机实现了节能和减排两个目标。汽油机稀燃技术在 20 世纪后期也得到了发展,稀燃技术对提高发动机燃油经济性十分有效。由于燃烧速率的减慢,稀燃技术需要配合速燃技术来实现快速燃烧,从而避免因燃烧速率减慢而降低发动机循环热效率,稀燃技术虽然可以降低燃油消耗率,但由于三效催化器不能净化 NO_x 排放物,同时,发动机输出功率会降低,需要采用增压方式来弥补,发动机成本和复杂性会提高,因此,汽油机稀燃技术没有得到实际应用。20 世纪 90 年代开始,汽油机缸内直接喷射技术引起人们的重视,并最终导致了直喷汽油机产品的出现。汽油机直喷方式降低了进气道混合气形成方式汽油机在部分负荷工况下的进气道节流损失,采用分层燃烧缸内直喷点燃式汽油机后,汽车在规定的运行工况下的平均燃油效率可提高 8% 以上,采用新的燃烧系统扩大分层燃烧的工作范围后,汽车平均燃油效率可提高 12% 以上,汽油机节能效果得到大幅度提高,此技术还可提高汽油机压缩比,从而提高汽油机的热效率,同时稀混合气工作方式也可提高热效率。缸内直喷汽油机 1996 年最先投入市场的是部分负荷下采用分层燃烧方式,日本和欧洲的产品基本上都采用这种方式。但这类汽油机一直未能成为汽油车市场的主流,至今尚未能在美国市场销售,其主要原因在于氮氧化物后处理和炭烟生成等问题仍有待于更妥善地解决。近年来,一种软喷射型缸内直喷汽油机较好地解决了燃油碰壁问题,发动机碳氢和炭烟排放问题得到解决。软喷射系统还有助于解决汽油机冷起动问题,但偏离当量燃空比下的氮氧化物问题仍然没能解决。2006 年以来,又有两款新型分层燃烧缸内直喷汽油机上市,这种新型分层燃烧系统早在 1994 年就被提出,它克服了过去分层燃烧系统的很多缺点,达到了分层燃烧系统的最高水平。但它仍需对稀燃排气中的氮氧化物进行后处理。根据目前的后处理技术,要求使用超低硫汽油,并需周期性加浓混合气以清除后处理器所吸附的氮氧化物,因此后处理技术广泛应用仍有障碍。2003 年年底,采用均匀混合气的缸内直喷汽油机开始上市,其后越来越多的缸内直喷汽油机改用均匀混合气,从 2006 年年初开始,市场上所有销售的缸内直喷汽油机汽车基本上都采用均匀混合气燃烧方式。均匀混合燃烧汽油机利用了直喷技术所带来的优点,采用可变气门定时来降低泵气损失或采用增压来减小发动机排量,在发动机节油的同时避免了氮氧化物后处理和炭烟生成等问题,成为汽油机节能和清洁利用的一条具有使用价值的技术途径。

汽油机直喷技术的应用使进入气缸油量滞后问题得到彻底解决,采用缸内直喷可减小空燃比变动的幅度,减小由于空燃比变动造成的油耗增加,使汽油机节油效果得到提高^[10]。增压均质混合气直喷发动机解决了增压后温度高、汽油机容易爆燃的问题,发动机增压减小排量后,在同样转矩下的平均有效压力增加,进气节流损失减小,混合气比热比增大,汽油机热效率得到提高。采用增压均匀混合气缸内直喷点燃式汽油机并减小排放来降低汽车平均油耗,近年来受到越来越多的重视,它是汽油机节能的一个重要方向。

汽油机的指示热效率在现有的基础上还有8%提高的余地,达到41%,除改善燃烧外,发动机摩擦磨损还有降低25%的可能空间。实现目标的方法是综合性的,如采用直喷汽油机技术、涡轮增压技术、可变配气相位和升程技术、提高压缩比等。汽油机缸内直喷正在由目前的基于燃烧室壁面引导燃烧向基于喷油控制的分层燃烧方向发展,由此带来了一些新的科学问题。

近年来,一种新的内燃机燃烧方式,即均质压燃受到越来越多的关注,与其他燃烧方式不同,均质压燃的燃烧使缸内混合气几乎同时到达自燃温度而几乎同时发生放热反应,在理论上是一个非扩散的燃烧过程^[11]。均质压燃可以在非常稀的混合气中进行,因而可以大幅度降低氮氧化物和炭烟的生成。它不依赖点火和火焰传播,避免了点燃燃烧对空燃比和压缩比的要求,燃烧过程实现了低温燃烧和快速燃烧,发动机散热损失降低,使得发动机热效率得到大幅度提高。试验表明,采用均质压燃的汽油机,其部分负荷热效率可超过目前柴油机的水平。均质压燃解决了分层燃烧缸内直喷点燃式汽油机氮氧化物后处理的问题,是一种节能减排的燃烧方式。均质压燃可在进气道混合气形成方式的汽油机和缸内直喷汽油机的基础上来实现,前者在部分负荷时需要采用可变配气技术,后者主要通过燃油喷射时刻的控制来实现,后一种方式实现起来对发动机硬件的改动很小,更容易在现有的汽油机上实现。

汽油机采用均质压燃的主要目的是降低汽油机油耗,同时也降低较难进行后处理的氮氧化物排放。汽油机均质压燃遇到的关键问题是混合气着火时刻控制和运行工况范围的拓展,由于完全依靠混合气压缩自燃,故着火时刻的控制比通过火花点火控制要困难,缸内混合气热状态和浓度决定了燃料燃烧的化学反应动力学过程,温度和浓度成为着火时刻控制的关键因素。浓混合气均质压燃容易发生汽油机爆震燃烧和生成高的氮氧化物,稀混合气均质压燃容易产生失火和生成高的碳氢排放,因此,汽油机均质压燃着火方式适合于工作在中等负荷范围,这也是汽油机均质压燃遇到的主要问题和技术瓶颈。目前,汽油机均质压燃的研究主要集中在实验室阶段,美国汽车公司已提出装有均质压燃汽油机汽车的市场推出计划,预计若干年后将有装载均质压燃汽油机的汽车上市。随着石油资源越来越

缺乏和大气中 CO_2 含量越来越高并影响气候,汽油机热效率提高的问题将会受到越来越多的关注,由于均质压燃汽油机有大幅度提高发动机热效率的潜力,因而从 21 世纪初就已成为汽油机燃烧系统研究最热点方向,以图从根本上改变汽油机热效率低的状况。为了达到电喷汽油机的平均有效压力和避免爆燃问题,可采用均质压燃和点燃结合的复合燃烧方式,即在低负荷工况采用均质压燃,在高负荷工况采用点燃,在超出均质压燃工作范围以外的工况采用点燃。采用复合燃烧方式可以解决均质压燃汽油机的冷起动问题,在发动机冷起动和暖机过程中采用点燃方式。

近年来,对环境保护的法规扩展到 CO_2 领域, CO_2 是燃油发动机所期待的最终燃烧产物,从提高燃烧效率的角度希望燃油中所有的碳都被氧化成 CO_2 。但 CO_2 产生温室效应,引起地球变暖。对燃油发动机来说,降低 CO_2 等同于降低油耗,随着能源紧张、油价上涨和环境保护的需求,燃油汽车节油将会得到更加重视。另外,发展低碳燃料、可再生生物质燃料也是降低 CO_2 排放的重要措施,因此,低碳燃料或可再生生物质燃料在内燃机中高效清洁利用将会成为未来的一个热点问题。

电喷汽油机的出现促使废气再循环得到更多的应用。由于三效催化反应器要求混合气的成分控制在当量燃空比,不能使用稀混合气,废气再循环就成为减少汽油机在部分负荷工况泵气损失和降低氮氧化物排放的一个有效的替代方法。

2) 柴油机

柴油机由于不存在汽油机爆震问题,可使用高的压缩比,其热效率比汽油机高 20%~30%,因此,柴油机在节能和减少 CO_2 排放方面具有更大的优势。目前,柴油机都采用直喷式燃烧室,20 世纪后期主要从合理组织混合气形成质量来提高柴油机的经济性和降低排放,主要追求燃油喷雾、空气运动和燃烧室的合理匹配,燃油喷射压力低于 100 MPa,柴油机主要排放物是氮氧化物和微粒。传统柴油机中,降低氮氧化物和微粒是一对相互制约的矛盾,改善燃烧过程的措施对降低微粒有力,但往往会增加氮氧化物排放,反之亦然。因此,难以通过缸内某一种措施来实现节能和氮氧化物排放降低,需要采用后处理装置来降低排放。20 世纪后期和 21 世纪初,柴油机燃油喷射压力不断提升,高压喷射达到 180~200 MPa,而目前国际上正在进行 300 MPa 以上喷射压力的研究,高压共轨技术保证了这一技术的实现,高的喷射压力基本解决了燃油雾化问题,燃油与空气的混合速率大大提高,柴油机炭烟生成问题基本上得到解决^[12]。柴油机采用电控高压喷射共轨燃油系统后,燃油喷射策略的灵活性得到大幅度提高,一个循环中的分段喷射和多段喷射得以实现,电控多段喷射可以控制燃烧放热速率,在提高燃油经济性的同时控制有害排放物的生成量。柴油机喷雾特性在很大程度上影响到

燃烧过程,继而影响到柴油机节能和有害污染物控制。对喷雾雾化、蒸发、混合的宏观物理过程已有一定的认识,但对喷雾的气相浓度场和液相浓度场测量和认识才是近几年的事情,它对于认识雾化机理和改进喷雾十分重要,特别是对在不断提高的喷射压力和采用多段喷射方式下的喷雾特性和混合气浓度分布特性需要给出定量的认识。高湍动能下的燃烧全历程混合对认识柴油机燃烧和节能可提供理论指导。柴油机增压技术特别是增压中冷技术是柴油机提高燃油经济性和降低排放的有效措施,目前先进柴油机在向高增压和可变增压方向发展,以进一步提高其动力性能、经济性能和降低排放。柴油机缸径小型化(downsize)和性能指标强化是轿车用柴油机的发展趋势,其可实现轿车柴油机节能和低排放。

柴油车因其显著的节油效果、能够满足不断严格的尾气排放标准,而得到了许多国家和地区(主要包括欧盟、美国等)的高度重视:采取措施鼓励发展柴油车。这些国家和地区首先是明确柴油技术在汽车节能技术中的战略定位,如欧盟一贯鼓励发展先进柴油技术和先进汽油技术,以提高传统燃料汽车的效率;美国政府2005年改变了以往对柴油技术的模糊态度,前总统布什曾说,如果美国的柴油轿车比重提高到20%,每天可节省30万桶原油。

柴油机具有40%~45%的能量转化率,而汽油机的能量转换效率只有30%~33%,柴油与汽油的这种能量转化率差异导致了燃料消耗的不同。与点燃式的汽油车相比,同种类型和排量的柴油车平均节油20%~30%。先进柴油车的节油能力更强,可以节油30%~45%,CO₂的排放量可减少20%以上。

柴油机的指示热效率还有7%的提高余地,达到52%,发动机摩擦磨损还有降低15%可能,具体措施有增压、燃烧控制和采用均质压燃、低温燃烧技术。通过燃烧技术降低柴油机排放取得了很大的进展,目前可以实现不采用后处理器满足欧IV/V排放目标,但对于更加严格的排放法规,仍需要取得进一步的突破,目前单凭控制燃烧还不够,需要配合后处理技术,如电控SCR+DPF,SCR中使用的尿素可减少粒径为20~100nm的颗粒。

柴油机均质压燃燃烧于20世纪90年代后得到关注,它采用的是高喷射压力和高油气混合速率来形成近似均匀的混合气,与传统柴油机喷雾主导的扩散燃烧不同,它可实现低温燃烧和均质混合气燃烧,因此,可以在提高柴油机热效率的前提下,同时避免氮氧化物和炭烟的生成,故而它被认为是柴油机实现高效低污染燃烧的新途径。目前,实验室阶段的研究结果已预示了,柴油机采用均质压燃燃烧会具有好的燃油经济性和非常低的氮氧化物与炭烟排放^[13]。控制燃油与空气混合速率是柴油机均质压燃的关键。在柴油机高效低污染途径探索上,国际上正在研究一种发动机新型燃烧方法,即柴油机低温燃烧方式。低温燃烧技术和传统延长滞燃期以使局部混合气稀薄化从而降低黑烟的方法不同,它是通过大流量

废气再循环大幅度降低燃烧温度，从而抑制炭烟生成反应的无烟化技术^[14]。该燃烧方式的混合气浓度和传统的柴油机燃烧一样，分布在包括较高当量比的宽广范围内，但由于大流量废气再循环的缘故，燃烧温度的分布范围从碳粒生成领域向低温侧移动，因而实现了同时降低碳粒和 NO_x 的目标（如图 5.4 所示）。

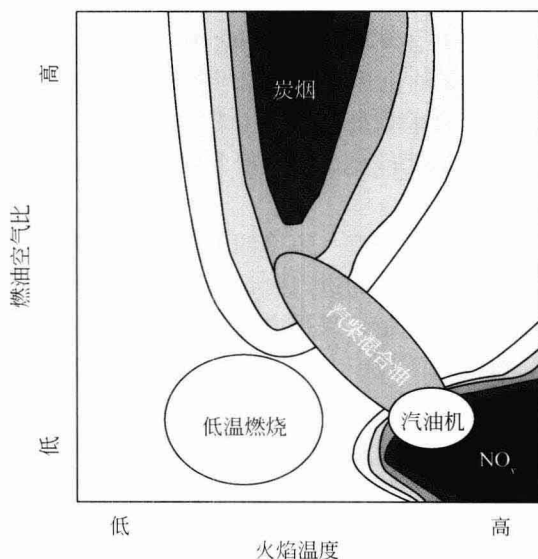


图 5.4 发动机燃烧炭烟和 NO_x 生成区域

均质压燃发动机的研究已从最初的柴油、汽油燃料扩展到天然气、二甲醚、醇类燃料和混合燃料，由于均质压燃发动机的燃烧过程还有很多现象和规律有待阐明，燃烧控制技术还有很多工作要做，故今后一段时间均质压燃发动机燃烧仍将是内燃机领域研究的重点和热点问题之一^[15]。以往的研究工作主要集中在均质充量压燃着火燃烧方式上，但最近有研究表明，非均质充量压燃着火燃烧方式在实现高效低污染同时更容易实现着火和燃烧过程的控制，且更易于在发动机上实现，因此，国内外已开始关注这方面的研究工作。此外，均质压燃发动机瞬态控制策略和方法也需要给予足够的关注和研究，它直接关系到均质压燃发动机在车用动力源上的应用。

低硫柴油将是我国今后低污染高品位柴油的研制目标，国际上研究比较集中在柴油组成对燃烧、排放以及排气后处理器等方面。生物乙醇在美国受到重视，由植物（速生灌木）通过微生物技术或生物化学技术来制备，属可再生燃料。美国已推广使用乙醇汽油（10%~15%生物乙醇加入汽油），其中生物乙醇既被

作为辛烷值增强剂,又可减少石油类燃料消耗量。乙醇柴油(需要添加少量助溶剂)在美国部分州也在使用,以降低柴油机炭烟排放。我国西部地域广大,种植速生灌木既可提供原料,也可绿化环境,减少水土流失,实现能源、经济、社会的可持续发展。

柴油机排气后处理技术也得到迅速发展,后处理技术主要集中在降低氮氧化物和炭烟两种排放物,如柴油机氧化催化器(DOC)、柴油机颗粒捕集器(DPF)、 NO_x 选择性催化还原(SCR)和稀 NO_x 捕捉器(LNT)以及降低 NO_x 和PM的组合后处理系统等。柴油机后处理需要使用低硫柴油才能获得好的效果,后处理装置一般成本较高。目前后处理装置主要用在商用大型柴油机和满足更高排放法规的柴油机上。柴油机降低排放的主要方法还是通过燃烧过程改善结合后处理装置。

柴油车提升燃油经济性的措施有:采用四气门技术,将发动机的喷油器布置在气缸的中央,有利于增大柴油机的进气充量,改善混合气的形成质量,提高燃烧效率,降低柴油机的燃油消耗量;采用增压中冷技术,通过采用可变增压、高增压或多级增压技术,提高增压比,合理设计中冷器,控制进气温度,从而提高燃油经济性;采用先进的燃油喷射系统,提高燃油喷射压力,由140MPa逐渐提高到250MPa,实现多段喷射,合理地设计喷油器,更好地雾化燃油,来提高燃烧效率;采用与进排气、燃烧控制策略以及后处理技术相结合的发动机智能控制技术,实现燃烧的最优化^[16]。

近年来,国内外广泛开展的以均质压燃、低温燃烧为代表的新一代内燃机燃烧理论极大地促进了内燃机燃烧学研究的发展。以低温燃烧和均质压燃为代表的新一代内燃机燃烧理论研究是国内外内燃机燃烧理论研究的重点,并取得了重大进展。新一代内燃机燃烧理论已从基础理论研究向指导工程应用方向发展。燃烧模式切换及瞬变工况控制是新一代内燃机燃烧技术应用的关键。

3) 替代燃料内燃机

替代燃料是内燃机实现高效低污染的一个重要途径,可实现燃料多样化和缓解化石类燃料供需矛盾的一条途径。国内外在生物乙醇、生物丁醇和生物柴油高效清洁燃烧方面已取得较好进展,生物柴油已开始试运行;在二甲醚、天然气、氢气、生物柴油、含氧燃料等替代燃料基础理论和应用方面也取得进展。

二甲醚作为柴油的替代燃料近年引起了国际广泛关注,无烟燃烧实现了低污染柴油机,研究较多的集中在喷雾特性、混合气形成过程、燃烧过程、燃油供给系统和改善润滑特性上,燃油供给系统还有一些技术问题需要解决。天然气主要在气道喷射预混合气发动机上采用,缸内直喷天然气发动机也有一定的研究,是未来的发展趋势。柴油机使用天然气可采用天然气火花点燃或天然气/柴油双燃

料燃烧方式,重点考察层流、湍流燃烧规律,微米级或纳米级颗粒物的形成及控制技术。醇类燃料主要分甲醇和乙醇,在柴油机和汽油机上都有应用。汽油机燃用甲醇或乙醇采取纯醇燃烧方式和掺混燃烧方式两种,实际使用中多采用掺醇燃烧方式,着火过程、化学反应动力学过程(醛生成过程)是主要研究对象。柴油机燃醇采用掺醇燃烧方式,目的是降低炭烟排放,柴油与醇混合存在互溶性问题,通过少量助溶剂(表面活性剂)已能实现柴油/乙醇的良好互溶,柴油/甲醇的助溶剂还有待于开展进一步的研究。对柴油/醇混合燃料发动机的燃烧已有了一定认识,包括着火滞燃期、燃料中氧含量对燃烧过程的作用、燃烧产物的生成规律,扩散燃烧与火焰发光程度等。与乙醇相比,丁醇具有更高的热值以及与柴油的互溶性,目前美国和欧洲在大力推广使用,但国内研究不多。生物燃料发动机在过去10年间受到广泛重视,所具有的低排放和可再生性使其成为未来柴油机极有前途的替代燃料之一。生物燃料的种类很多,燃料特性也不尽相同,各国应根据国情和燃料状况合理选择,目前对若干种生物燃料的喷雾特性、燃烧与排放特性有了一定的认识,数值模拟开展得还比较少。

喷雾、缸内气流运动和燃烧室是实现良好燃烧的关键因素,人们对旋流喷雾特性已有比较深入的认识,数值模拟已能很好地与实验结果吻合;采用数值模拟已能很好地预测缸内浓度场、温度场、NO和OH生成情况;对缸内流的破碎过程及层状混合气湍流燃烧规律也有了一定的认识;缸内直喷汽油机电子控制技术也得到了长足的发展;可视化技术已广泛应用在汽油机燃烧研究中,如采用激光诱导荧光法(LIF)测量浓度场分布规律,研究缸内直喷汽油机的燃烧循环变动。在容弹和发动机上开展了湍流流场、湍流火焰传播速率和非均匀浓度场以及汽油机缸内滚流等方面的基础研究,结合缸内直喷汽油机燃烧研究,开展层状混合气条件下湍流火焰传播速率研究测量工作;采用激光全息技术对湍流火焰的结构进行了分析,获得了定量的火焰结构和发展规律;采用CFD方法建立了汽油机三维燃烧模型。

高效低污染内燃机燃烧是国际内燃机的研究和发展趋势,是带动内燃机基础研究和先进技术开发的动力源。近年来除继续提高汽油机和柴油机的燃油经济性、降低排放外,一些新型的燃烧方式得到内燃机研究者的广泛关注并进行重点研究,如在汽油机和柴油机基础上都可实现的HCCI方式,浓混合气结合废气再循环的低温燃烧方式,以高压共轨多脉冲喷射的先进柴油机技术,以燃油高压喷射和先进后处理技术结合的内燃机系统,以汽油机缸内直喷技术为代表的先进汽油机技术,以提高内燃机功率密度的高增压强化燃烧理论和技术,以灵活燃料燃烧控制为目标的Smart Engine燃烧控制理论与技术等,以替代石油类的清洁燃料实现内燃机高效低污染的发动机理论与关键技术研究,基于光学诊断的内燃机缸

内燃烧和污染物诊断技术, 基于大涡模拟和直接数值计算的内燃机喷雾、流动和燃烧的数值模拟技术, 内燃机排气能量回收与利用技术, 特别是以内燃机燃烧为背景的基础燃烧研究得到研究者的重点关注, 人们更加认识到对基础燃烧的认识程度在内燃机燃烧研究水平提升、基本现象阐明和理论发展方面的重要性^[16]。内燃机缸内燃烧化学反应动力学及有害产物生成动力学机理成为内燃机基础燃烧研究的热点科学问题。多学科融合趋势越发明显, 原来以重视技术开发的内燃机研究越来越重视理论上的创新, 从而促进了内燃机研究工作的深化和提升。美国能源部、汽车企业、国家实验室和高校在此方面都给予重点支持和研究, 欧洲和日本也有很多政府计划和企业项目给予支持, 我国政府也在科技计划和基金项目中给予了支持, 从而大大带动了我国内燃机研究水平的提升, 缩短了与发达国家之间的差距。可以说, 国内外内燃机研究又进入一个理论发展和技术进步的发展阶段, 这给内燃机研究者既带来了机遇, 也带来了挑战。

4) 内燃机燃烧模型

内燃机燃烧在时间和空间上极为复杂, 具有强瞬变、强涡流、强压缩和各相异性的特点, 燃烧模型研究近年进展不大, 最大障碍是湍流的描述很困难, 湍流与化学反应的互动关系认识还不够深入。燃烧放热引起燃烧室内的密度差异使湍流结构复杂化, 燃烧高温导致流体输运系数变大, 大大增加了动量、质量与能量的交换速率, 还要考虑反应的时空分布。燃烧过程的着火和火焰传播等燃烧过程还主要依靠经验和半经验模型, 这已成为研究深化的瓶颈。国外正尝试通过直接数值模拟分析内燃机燃烧过程。内燃机(柴油机)当量比和缸内气体温度分布的不准确, 导致 NO 和炭烟预测的偏差过大(温度 50K, NO 10%~20%), 炭烟模型和机理还不十分清楚, 提出的各种模型只有对比价值, 是目前国际上内燃机燃烧研究的难题。用 Chemkin 计算的内燃机化学反应过程只是一种近似方法, 仅用于定性分析和比较。

内燃机数值模拟仍是过去 10 年间研究的主要内容, 它已发展到二维、三维湍流燃烧模型。大涡模拟已开始应用于内燃机缸内流动和喷雾混合的研究, 多维 CFD 程序已引入湍流燃烧, 并建立了若干湍流燃烧模型, 包括油束破碎、油滴碰撞、合并、蒸发、扩散混合等喷雾模型, 自燃模型(柴油机)或点火模型(汽油机), 预混燃烧模型, 湍流扩散燃烧模型, 爆震预测模型和排放模型。油束破碎模型包括 TAB (Taylor analog breakup) 模型、Wave 模型、Reitz-Diwarkar (GM_B) 模型、FIPA 模型、Huh_Gosman 模型、KH_RT 模型等。自燃模型包括 Halstead 的 SHELL 八步反应模型、IFP 四步反应模型和 Muller 模型等, 对汽油机的预混湍流燃烧模型有化学反应动力学模型、特征时间尺度燃烧模型、火焰片燃烧模型和火焰传播燃烧模型等。对柴油机的湍流扩散燃烧模型有 EBU (Eddy

break up) 燃烧模型、拟序火焰片燃烧模型等。采用概率密度函数模型是求解湍流燃烧的新方法, 通过求解反应产物质量分数的平均值及其变化量的输运方程分析湍流燃烧, 但该方法要求采用精确的化学反应机理以描述湍流与化学反应间的强烈相互作用, 对算法设计和计算机的要求很高。根据不同的气液燃料发动机和燃料种类, 研究中选用相应的湍流燃烧模型。

2. 航空发动机燃烧

燃气轮机燃烧(图 5.5) 研究集中在改善燃油雾化质量和组织低 NO_x 燃烧, 利用旋流喷嘴、燃油碰壁和空气辅助促进雾化已取得很好的效果。在稀预混燃烧、扩散火焰燃烧和燃烧稳定性方面开展了较多的工作, 对低 NO_x 扩散火焰燃烧器进行了重点研究。采用 CFD 已能很好地把握燃料喷流喷射和混合过程, 建立了燃气轮机的两相流和燃烧模型, 还利用详细化学反应动力学模型计算了燃烧过程及燃烧污染物。催化燃烧技术被应用在燃气轮机燃烧中用以实现超低 NO_x 燃烧 ($<9\text{ppm}$)。热声效应也是近年的热点之一。燃气轮机内部两相流场和温度场的测量和数值模拟, 燃用不同燃料和燃烧控制技术也取得一定进展。微型燃气轮机燃烧过程也开展了一定的前期性研究工作。

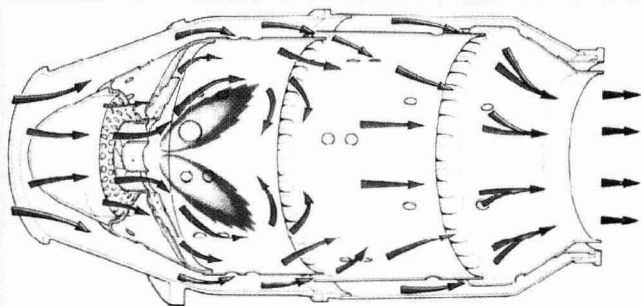


图 5.5 航空发动机燃烧

为了满足 21 世纪高性能飞机发展的需要, 要求航空燃气轮机燃烧室在更高的压力、更低的油气比、更宽广的工作范围内稳定可靠地工作, 燃烧室工作条件由常规向超常规发展, 主攻目标集中在民用机低污染燃烧及军用机高性能燃烧技术上。低污染燃烧的核心措施是在任何工况下保证燃烧区当量比及局部当量比的均匀性, 采用的具体方法有设计点下的富油/急冷/贫油燃烧 (RQL)、贫油预混预蒸发 (LPP) 燃烧、贫油直接喷射 (LDI) 技术和非设计点下的燃油分级、燃烧分区以及可变几何结构技术。军用高性能高参数燃烧室的特点是在高温高压的

超临界环境中组织高效高强度燃烧, 目前比较先进的概念包括 TVC 燃烧室(驻涡燃烧室)和 UCC 燃烧室(极紧凑燃烧室)。在国家基金及行业预研项目的资助下国内已开始了相关技术跟踪工作, 但相应的燃油雾化、蒸发及混合机理, 燃烧室内部气动流型基本规律及组织燃烧机理, 污染排放的生成与控制机理等尚不清楚, 亟待开展深入的理论研究。

3. 火箭发动机燃烧

液体火箭发动机燃烧过程关键基础问题是燃烧不稳定, 包括燃气发生器和推力室的燃烧不稳定。在充分掌握不同燃料/氧化剂体系雾化、蒸发、混合和高压化学动力学过程规律和机理的基础上, 获得热声耦合机理, 实现燃烧不稳定控制由被动向主动的转变。

固体火箭发动机燃烧过程关键基础问题是发展细观燃烧模型, 在此基础上获得燃烧不稳定性和特殊条件下固体推进剂燃烧规律。随着推进技术的进一步发展, 固体推进剂的工作环境越来越恶劣和多变。目前很多国家都在开展固体推进剂的细观燃烧模型研究。

火箭发动机的燃烧研究主要依托先进流场仿真技术和精细化的实验研究来展开。例如, 用非定常光学测量技术对燃烧区化学成分进行二维成像, 用发射光谱和平面激光诱导荧光技术(PLIF)对液体推进剂脉动燃烧过程的 CH、OH 等组分瞬时分布进行测量。

4. 爆震发动机燃烧

自然界有两类燃烧波: 爆震(detonation)与缓燃(deflagration), 它们有各自的特点和应用范围。爆震波实质就是激波加上跟在其后的、与之紧密耦合的缓燃波, 具有自增压及传播速度超声速的特点, 类似于等容燃烧。

脉冲爆震发动机(PDE)利用周期性爆震波产生的高温高压燃气发出的冲量来产生推动力, 具有热循环效率高、结构简单、推重比高等优点, 主要用于高超声速飞行器推进和其他特殊用途。过去二十几年国际上在工作稳定性、提高爆震频率、爆震波的起爆和传播规律、传热特性、气体动力学性能、喷油器和燃烧室设计以及数值模拟等方面都已取得很大进展, 如 NASA 研发出高脉冲爆震频率($>60\text{Hz}$)气相燃烧器, 比传统的近等压燃烧器具有更好的热效率, 空气和燃料的供给压力降低使燃烧室结构得到简化。脉冲爆震发动机可大幅度降低 NO_x 和 CO_2 排放, 飞行速度可达到 5 马赫以上, 有望成为未来航空航天快速交通工具的动力。在一系列国家基金面上项目和重点项目的持续资助下, 国内研究单位经过近 20 年的努力, 已形成系统的 PDE 理论体系和试验基地, 研制出火箭式和吸气

式等系列原理样机,在两相 PDE 的研究方面独具特色,引起了国际同行的关注。

最近由美国人提出的多模态爆震组合循环发动机构想有望使飞行器的飞行马赫数拓宽至 25。对应于 4 个飞行马赫数区间,该发动机采用四种工作模态,以各种不同形式的爆震燃烧为基础,采用单一流路同一发动机结构,结构简单、总压损失小,构思奇妙,原理可行,被认为是一种不同于超燃冲压发动机的高超声速飞行器以及空天飞机新型动力替代方案,开辟了一个富有挑战的极具吸引力的理论研究新领域。

微爆震作为微型燃烧器的一种形式,由于采用的是热循环效率更高的爆震燃烧,在国际上已引起了研究者的兴趣。据估计,微爆震发动机可能取得比常规尺度爆震发动机更高的单位性能,且应用面更广。因而,微爆震也是目前爆震燃烧研究的一个前沿方向,急需开展相关的理论和应用基础研究。

5. 超燃冲压发动机燃烧

超燃冲压发动机燃烧实质是在超声速气流中组织高效的亚声速等压燃烧。在超燃冲压发动机燃烧室流场中,在超声速流中动能的增加甚至能达到与化学反应释热相同的量级,湍流脉动比在亚声速流场中更加剧烈,实验数据表明在超声速燃烧室组分浓度和温度脉动可分别达到 40% 和 20%,忽略这些脉动对平均反应速率的影响会导致对流场的错误描述,进而可能错误地预测流场中的主要组分分布。因此湍流脉动的影响不可忽略,湍流和燃烧的相互作用对发动机的燃烧效率、发动机性能有着至关重要的影响,目前的各种湍流燃烧模型应用于超声速燃烧仍有很大的限制和不确定性,必须发展新的湍流燃烧模型,将复杂化学反应动力学和湍流运动之间强烈的耦合关系解耦。

我国在发动机燃烧研究方面整体上与国际先进水平还有一定的差距,主要反映在研究工作的深度上,但在局部方面已达到国际先进水平。科技部和国家自然科学基金委员会对内燃机燃烧的研究工作给予了大力支持和重点资助,为提高我国发动机燃烧水平提供了支撑。国家“八五”期间资助了“煤和石油高效低污染燃烧基础性研究”的攀登计划项目,使我国在内燃机气流运动规律、燃烧规律和污染物净化规律方面取得了长足的进展;“十五”以来,973 计划项目连续 10 年资助了“新一代内燃机燃烧理论和石油燃料替代途径的基础研究”项目,集中了我国内燃机燃烧研究主要力量,与国际同步开展了均质压燃、低温燃烧基础理论的研究,在“均质压燃、低温燃烧”为代表的新一代内燃机燃烧理论和代用燃料发动机燃烧方面取得了很好的研究进展,在国际燃烧学术界也形成了一定的影响。在国家自然科学基金委员会重点项目资助下开展了车用内燃机新概念燃烧方式、清洁燃料燃烧基础理论、爆震发动机燃烧基础理论与控制技术等方面的

基础性研究工作,并取得重要研究成果。在国家杰出青年科学基金项目资助下,在天然气发动机燃烧基础理论与关键技术、发动机可控预混合燃烧机理方面进行了深入研究,对揭示天然气层状混合气燃烧规律和二甲醚预混控制混合气燃烧规律提供了理论支撑。此外,国家自然科学基金重点项目和面上项目还资助了内燃机混合气形成、着火过程、燃料喷雾、代用燃料、污染物控制、燃烧过程数值模拟、燃烧控制技术等方面的基础研究和应用基础研究工作,这些研究工作对促进我国发动机燃烧研究整体水平的提高,带动我国燃烧发动机学科的发展起到了重要作用。

通过科学基金的资助,我国气液燃料燃烧领域已成长了一批优秀学者,其中有 1 位国家基础性研究计划项目首席科学家,4 位教育部“长江学者奖励计划”特聘教授,3 位国家杰出青年基金获得者。

5.2.4 固体燃料燃烧

煤炭一直是电力工业的主要燃料,这种能源结构与传统的煤利用方式产生了大量工业污染物,如 SO_x 、 NO_x 、 CO_2 、重金属及颗粒物等,引发了严重的环境污染。近年来,发达国家(包括美国、欧盟、日本、澳大利亚、加拿大等)通过一系列洁净煤技术的研究开发,形成了一批从选煤、气化、液化、燃烧、烟气净化到煤气化联合循环发电、燃料电池发电等先进的产业化技术。

美国是世界上煤炭生产与消费大国,煤炭产量仅次于中国。美国非常重视洁净煤技术的研究,将其视为实现和保证能源稳定、安全和有力发展的关键。2002 年在布什总统国家能源政策(NEP)“增加洁净煤技术投入”的指示下,美国推出了洁净煤电力提案 CCPI,旨在加快先进洁净煤技术的商业化,以保证美国拥有清洁、可靠和经济的电力供应。2003 年年初美国政府宣布开始执行 FutureGen 项目,计划投资 10 亿美元,10 年内建成一座以煤气化为基础,发电 275MW/制氢/液体燃料联产,并与 CO_2 捕获、封存相结合,实现 CO_2 近零排放的新一代清洁能源示范厂;2010 年,美国奥巴马政府又正式宣布了 FutureGen 2.0 项目,旨在建设以实施 CO_2 减排为目标的 O_2/CO_2 循环燃烧示范电站。从 FutureGen 到 FutureGen 2.0,无论是强调煤制氢、促进氢能在发电及交通行业的作用,还是 CO_2 减排、封存与资源化利用,其目标无不都是在 Vision21 概念的基础上,在真正意义上实现近零排放的洁净煤燃烧。

欧盟推出了未来能源计划,其洁净煤发展计划的主旨是促进欧洲能源利用新技术的开发,减少对石油的依赖和煤炭利用时所造成的环境污染,提高能源转换和利用效率,减少 CO_2 和其他温室气体排放,使燃煤发电更加洁净,通过提高效率减少煤炭消耗。目前,研究开发的项目有:整体煤气化联合循环发电;煤与生

物质、工业/城市/农业固体废弃物的共同气化（或燃烧）；固体燃料气化/燃料电池联合循环；循环流化床燃烧技术等。

日本为摆脱对石油的过分依赖，早在1980年即成立了“新能源工业技术综合开发机构”（NEDO），机构内组建了“洁净煤技术中心”，专门负责开发21世纪的煤炭利用技术，并以几千亿日元的投资与澳大利亚、美国、中国等国合作，用于褐煤炼油、煤炭液化、气化及水煤浆利用等方面的研究。日本目前正开发的项目有：①煤炭高效利用技术，如IGCC、CFBC和PFBC等洁净煤发电技术；②煤炭预处理和烟气净化技术，如煤炭洗选技术、烟气处理技术、脱硫和脱氮技术等；③加压流化床锅炉的技术开发；④煤合成气燃料电池等。其目标是在21世纪大幅度提高燃煤发电的比例，同时不增加环境污染程度。

上述各国在洁净煤技术中取得了初步成果，促进了能源行业以及煤炭加工行业的科学技术进步，有些已取得了实质性收益。对一些新开发的项目，如新型发电、气化、液化、水煤浆技术等，大多由国家支持建立了商业性示范工程。由于市场经济性影响，暂时不能广泛推行，但从长远（特别是21世纪中期以后）发展来看，这些技术会逐渐显现出优势^[8,9]。

近20年来，我国学者针对煤粉火焰的燃烧、传热特性及其矿物成分的高温迁移行为等燃煤基础和应用问题开展了卓有成效的研究，取得了令人瞩目的进展，如先进煤粉燃烧器（高效、稳燃、低污染、多煤种适应性），煤的优化配置，防结渣、防高温腐蚀煤粉燃烧技术等。在燃煤污染研究方面，不仅涉及常规的 SO_x 、 NO_x ，而且对痕量重金属、可吸入颗粒物、温室气体 CO_2 等国际热点研究方向也开展了系统研究，获得了国际同行的认同。尽管在上述基础理论和应用技术方面取得了大量成果，研究水平有了长足进步，但整体上与发达国家相比还有相当大的差距，尤其是对煤燃烧及利用技术前沿方向的把握上，只能做到“紧跟国际前沿”，尚应紧密联系我国国情，自主提出涉及煤科学与技术的前瞻性研究方向，彻底解决总体能源利用效率低下的难题，这也是燃煤大国的实际需求。

我国燃煤发电已走过100多年的发展历程。随着国家对节能和环保标准的日益严格，常规的发电技术和设备已经很难达到要求。近年先后引进一些先进的发电技术和设备，同时采取煤粉锅炉超临界和超超临界参数化，并进一步向超大容量发展，以提高常规发电方式的能量转化效率，缩小了与发达国家之间的差距。目前，我国已经能够对大容量锅炉完成自行设计，但是相关技术还不能说非常成熟，特别是还不能独立完成二次开发。

在燃煤发电方面，目前发展迅猛的洁净煤技术有超（超）临界压力锅炉加烟气脱硫技术（PC-FGD）、循环流化床锅炉技术（CFBC）等。超（超）临界参数锅炉已发展近半个世纪，蒸汽参数有十余个等级：压力范围23.5～34.6MPa，温度

范围 538 ~ 649℃, 热效率 41% ~ 47%, 供电煤耗 290 ~ 329g 标准煤/(kW · h), NO_x、SO₂、CO₂ 排放量相对较少, 机组可用率和亚临界机组在同一水平 (90% ~ 99%), 稳燃负荷范围 40% ~ 100%, 负荷变化速度为每分钟 5% 左右, 调峰能力强, 低负荷时也能保持较高热效率, 投资比同容量亚临界机组造价高 5% ~ 20%^[17]。目前, 我国已建成 1000MW 级超 (超) 临界参数锅炉多台, 部分机组的发电煤耗已达到世界先进水平。而增压流化床锅炉联合循环 (PFBC) 的热效率一般为 42% 左右, 与整体式煤气化联合循环发电技术 (IGCC) 机组类似, 由于其系统复杂、技术难点多等因素, 其容量一般小于常规煤粉发电机组。综合来看, 在我国现有的经济技术水平下, PC-FGD 技术应优先发展。

国际上有关煤燃烧污染物形成机理和控制的研究开展较早, 已有的控制途径多是针对单一污染物分别进行, 如尾部烟气脱硫 (FGD)、选择性催化还原脱硝 (SCR)、选择性非催化还原脱硝 (SNCR) 等。近年来, 燃煤污染物一体化脱除及控制技术的研究也日益受到重视 (如脱硫除尘一体化、脱硫脱硝一体化等), 并在发达国家得到应用。然而, 这些一体化控制技术往往投资、运行成本高。因此, 发展符合中国国情的低成本污染物综合控制方法势在必行。

采取何种煤燃烧及利用技术实现温室气体 CO₂ 的减排, 国际上尚存在争论。一种观点认为新建电厂只应采用 IGCC 技术; 另一种观点则偏重在未来 CO₂ 排放税征收的条件下, 逐步以 PC-FGD 技术为基础, 完善并实现 CCS 技术、使其成本逐步最小化。氧/燃料燃烧方式和燃烧后 CO₂ 捕获技术在后一观点中占有重要地位, 且正成为学术界的研究热点。与常规空气燃烧方式不同, 氧/燃料燃烧方式采用较高浓度的氧气与煤粉燃烧, 并通过烟气循环将出口烟气中 CO₂ 浓度提高到 90% 以上, 达到可资源化利用或集中封存的目的。与传统燃烧方式相比, 新型氧/燃料燃烧方式下炉内 N₂ 被 CO₂ 替代, 煤粉着火、火焰传播及炉内换热产生较大差异; 工程应用方面, 氧/燃料燃烧方式的示范工程目前进展较慢, 大型化更需要较长的时间。总体来看, 在技术上实现 CO₂ 的捕获和封存难度不大, 关键是经济上尚未找到获利模式, 尤其是在征收 CO₂ 排放税之前。

煤炭不仅是一种化石燃料, 还是很重要的化工原料, 其直接燃烧并非唯一的利用方式。世界各发达国家均提出了煤气化、液化及多联产等煤资源化利用的研究计划, 力图开发新型煤的转换技术, 实现以煤气化发电、车用燃料和化工产品合成为主要内容多联产。中国也出台了一系列实现资源、环境与国民经济协调发展的规划, 将煤的清洁高效开发利用、液化及多联产列为最优先的研究主题之一。

随着人类各种物质消费的日益多样化, 城市固体废弃物也带来了严重的环境问题。全世界每年新增废弃物超过 100 亿 t, 美国城市固体废弃物排出量为全球

之冠, 每年高达 2.2 亿 t; 根据有关统计, 截至 2006 年年底, 我国 661 个设市城市固体废弃物清运量达 1.48 亿 t/年, 且以填埋方式为主, 而以焚烧发电或供热为主的无害化处理方式尚未得到普及。从世界范围看, 利用城市固体废弃物生产蒸汽和发电已有百余年的历史, 发达国家起步早, 现已获得充分发展。德国已有 50 余座从固体废弃物中提取能量的装置及十多家发电厂, 用于热电联产, 对城市进行采暖或提供工业用汽; 法国共有焚烧炉约 300 台, 可将城市固体废弃物的 40% 以上处理掉; 日本有固体废弃物电站 100 余座, 处理总量每日 5.2 万 t, 占固体废弃物总量的 73%, 发电总容量为 320MW; 美国 20 世纪 80 年代兴建 90 座焚烧厂, 年总处理能力 3000 万 t, 90 年代新建 402 座, 固体废弃物焚烧发电占总固体废弃物处理量由 90 年代初的 18% 增加到 2000 年的 40%。我国固体废弃物焚烧起步较晚, 但相关产业的发展正进入高速成长期。另外, 固体废弃物焚烧提供能量的同时也会带来严重的二次环境污染 (如颗粒物、痕量元素及二噁英等有机物污染)。发达国家对此做了大量的研究, 提出了一些有效的控制方法。随着污染物排放标准及无害化程度的进一步提高, 一些常规的控制方法很难达到要求, 国外已经开始生态型焚烧技术的研究, 通过提高焚烧温度和采用气化熔融技术, 不仅控制了二噁英的生成, 而且使固体废弃物中的重金属尽可能从烟道排出后进行处理或资源化利用, 达到灰渣无害化处理的目的。

如前所述, 固体燃料燃烧是一个流动、化学反应、传热传质相互耦合的复杂物理、化学过程。相对较为简单的均相燃烧过程而言, 煤粉等固体燃料的燃烧由于涉及气-固两相甚至多相化学反应, 其燃烧过程将经历更为复杂的物理变化和化学变化。近几十年以来, 实际燃烧装置内的流动、燃烧过程的数值模型研究取得了长足的发展, 涉及湍流流动和详细反应机理的数值计算方法依然是学术界研究的热点、难点问题。目前, 湍流燃烧模拟的方法有直接数值模拟、大涡模拟、格子-玻尔兹曼方法、随机涡模拟、概率密度函数输运方程模拟、条件矩模型、简化概率密度函数模型、关联矩模型、基于简单物理概念的一些唯象模型等。到目前为止, 已经研究和发展的不同的湍流燃烧模型, 总的趋势是寻找更为合理的模拟有限速率详细反应动力学与湍流相互作用的方法。直接模拟和大涡模拟仍然是计算量很大的模拟方法, 离工程应用尚有相当的距离, 但它们在揭示机理、检验和完善工程模型方面有十分重要的价值。输运方程的概率密度函数方法因其对湍流关联矩的自封闭而具有极大的优势, 但求解的复杂性和计算量之大给其广泛应用带来了很大的困难。层流小火焰模型、BML 模型、EBU 模型仍将是工程上广泛应用的模型, 特别是预混燃烧的 EBU 模型和扩散燃烧的简化的 PDF 模型, 关联矩与概率密度函数封闭方法相结合是工程应用能够接受并有潜力的研究方向。唯象湍流燃烧模型中的部分模型已经很少应用, 不会再有进一步的发展。上

述湍流模型在模拟精度、合理性和经济性上各有不同特点,但是如何寻找一种既合理而又经济的模型,是尚待解决的问题。简单化学反应机理包含的物质组分和基元反应的个数都大大减少,通常只包含反应系统最主要的几种物质组分以及它们相互间可能的反应,往往不涉及如污染物等含量较低的组分;这种计算效率的提高是以牺牲化学精度为代价的,通常情况下不能全面、精确描述燃烧过程的某些特征,尤其在如含量较低的燃烧污染物排放的预报方面;尽管如此,因其计算效率高而得到较为广泛的应用。在详细反应机理的应用方面,由于其中包含了大量的物质组分和众多的基元反应,加之各基元反应时间尺度的差别($10^{-9} \sim 10^{-2} \text{ s}$)所导致的数值计算中的“刚性(stiffness)”问题,使得其在应用于较复杂的流动、燃烧时,对计算机速度和存储量的要求非常苛刻,此类燃烧计算过程会花费很长时间,限制了其工程应用;尽管如此,由于其化学精度高,随着计算机技术的进一步发展,在实际数值模拟中的应用正逐渐成为可能。

综上所述,面对我国燃煤利用过程中效率低、污染严重两大难题,需要积极开展煤的高效清洁利用过程中燃烧基础理论,污染物的生成、迁移与控制,环境友好的煤基多联产资源化利用,燃煤近零排放等方面的研究。新形势下,与煤燃烧相关的战略问题是:开发可行的煤气化/液化及多联产、氧/燃料燃烧等煤燃烧及利用新技术;在保证经济增长的同时,逐步研究并应用新的 CCS 技术及其他燃煤污染物排放及控制新技术,根本治理煤炭燃烧和利用过程中对环境的污染,实现能源与环境的可持续协调发展。

5.2.5 火灾燃烧

火灾科学是 20 世纪 70 年代后期逐渐兴起的一门多学科交叉的应用基础科学,发展针对各种火灾过程的预测理论和防治技术是火灾科学的基本任务。近 40 年来火灾科学发展迅速,从可燃物热解、着火、建筑受限空间火蔓延直至城市与森林开放空间的火灾发展,火灾科学所研究的问题跨越多个空间尺度和动力学时间尺度。

火灾过程是具有复杂性本质的灾害性燃烧现象。与工程燃烧相比,火灾可燃物种类更为复杂,燃烧模式涉及预混燃烧、扩散燃烧和多相燃烧,燃烧与环境条件的复杂耦合可诱发轰燃、回燃、阴燃、飞火和火旋风等特殊火现象,这些特殊火现象常常是诱发重大火灾的重要原因^[18];火灾体系的边界条件多样、不规则,开放空间的火灾更受到复杂环境与气象条件的影响;火灾现象具有确定性和随机性的双重性规律。火灾科学有自己的学术思想、理论体系和研究方法,研究方法突出体现了火灾双重性规律的特点:一方面用统计的方法研究火灾的随机性,归纳出火灾发生的统计规律;另一方面是探索火灾自身发展规律,即研究火灾的确

定性规律。

火灾科学的基础研究中,已经形成实验模拟和计算机模拟两大研究领域。火灾实验模拟研究主要有三种形式:①火灾过程分现象研究,其目标是取得对分现象的定量了解,如热解着火过程、火蔓延过程、烟气运动过程等;②火灾特殊现象研究,火灾特殊现象指只有在火灾系统中才会发生的特殊燃烧现象,如轰燃、回燃、滚燃、飞火、火旋风等;③火灾模拟实验方法的研究,实验研究虽然为科学家提供了掌握和揭示火灾机理及规律的条件,但只有在火灾的实验现象与实际现象之间建立起科学联系,才能将人们对火灾机理和规律的认识能动地体现在火灾防治的实践中去,真正做到“理论指导实践”,不仅为火灾科学实验提供方法和依据,也为研究与应用的结合搭建沟通的桥梁。而计算机模拟是再现火灾过程并研究其发展规律的重要科学途径,这其中包括研究基于试验结果的经验模型、基于普遍理论知识并与实验研究相结合的半物理模型以及结合具体研究的火灾分过程,发展优化的模拟数值算法三个方面的任务。作为三种主要的火灾模拟方法,区域模拟(zone model)、场模拟(field model)和场-区-网模拟(field-zone-network model)的研究都已获得了很大的进展。区域模拟将被研究的火灾区域划分为较少的几个部分进行模拟,但这种方法不能揭示流场的细节,特别对于强火源或强通风的区域,使用区域模拟就显得过于粗糙。场模拟则是对被研究火灾区域利用计算流体力学方法进行研究的一种详细模拟方法。由于模拟算法本身的复杂性和计算机能力的限制,使这种方法在理论上仍存在不少困难。我国火灾科学研究人员针对区域模拟和场模拟各自的不足,提出了分析建筑火灾烟气流动的场-区-网(FZN)模拟思想,即对强火源或强通风的区域采用场模拟,对其邻近的区域采用区域模拟,而对相隔较远的区域采用网络模拟。这种模拟思想相对于区域模拟来说提高了模拟的精确性,而相对于场模拟来说降低了算法复杂性。进一步的研究方向是深入研究适用于不同空间尺度和复杂性结构的受限空间烟气输运模拟方法,深化近年来日益取得进步的场-区-网模拟研究,加强大涡模拟、直接数值模拟的理论与计算方法研究,力图解决大型复杂建筑火灾烟气流动模拟中计算规模和计算精度之间的矛盾。

火灾科学的基础研究总体包括两大方面:火灾演化理论和火灾防治基础理论。所谓火灾演化,指火灾孕育、发生和发展以及熄灭的全过程。

热解是固体可燃物火灾的重要孕育过程,它从燃料和热量的生成两方面对着火和火灾发展过程起着关键控制作用^[19]。包括中国在内的多国学者已经针对木材、PVC、化纤、塑料、皮革和橡胶等多种典型可燃物,开展了大量小尺度条件下的热解反应动力学模型和实际可燃物尺度下的热解物理模型构建,取得重要进展。在固体可燃物热解反应动力学研究方面,自20世纪以来,国际学者提出了

使用若干“伪组分”在全局温度区间内的热解反应叠加来构成总体热解过程模型的思想,建立了纤维素质可燃物热解的“多组分全局反应模型”。我国学者通过大量可燃物热解实验并根据对热解机理的分析,提出了“分阶段模拟”的新思路,构建了分别在两个升温阶段进行热解模拟的“双组分分阶段一级反应模型”,并在固体热解反应动力学分析方法方面取得了系统性的进展。在热解物理模型研究方面,国际上提出了许多恒定热流条件下的一维可燃物热解物理模型,我国学者对此进行了改进和完善,建立了纤维素质可燃物在变化热流条件下热解的一维物理模型。由于火灾条件下的可燃物热解包含传热传质等物理输运和化学反应过程的强烈耦合,未来的趋势是深刻认识可燃物热解动力学的尺度效应,揭示物理输运效应对热解动力学行为的影响机制与规律,建立火灾高热流条件下体现物理输运动力学和化学反应动力学综合效应的固体可燃物热解模型。无外部热流条件下的不同尺度下可燃物热自燃动力学机制,低压低氧条件下可燃物热解化学动力学模型和物理模型等也是火灾孕育机理的重要研究方向。

在着火规律研究方面,国际上主要针对常热流条件提出了多种着火判据,我国学者则研究了火灾变热流条件下可燃物的着火规律,揭示了热解挥发分辐射衰减特性及其对着火模型的影响,把辐射衰减效应成功地引入到经典固体可燃物热解着火模型中。由于近年来我国重大建筑工程中采用大量新型建筑材料,如新型装饰材料、节能保温材料等,这些新型材料在火灾发生时的燃烧蔓延模式与常规建筑材料相比存在明显差异,故未来亟须研究新型建筑材料在其应用场景中的引燃机理。

火蔓延是火灾的重要分过程,从受限建筑单元空间到开放城市与森林环境,火蔓延的机理与规律存在明显的多尺度效应。在可燃物小尺度的表面火蔓延方面,迄今已积累了大量常规的炭化和非炭化固体材料表面的火蔓延数据,且建立了不同表面条件下的火蔓延理论模型。在受限空间火蔓延方面,各种火源(种类和布局)条件下的室内火羽流理论和火灾烟气输运预测理论已经比较成熟,但高层建筑中受各种竖向通道内的“烟囱效应”和“活塞风效应”等显著影响的火蔓延及烟气输运过程,以及由受限空间向外部空间蔓延的火灾发展过程的研究尚属初步。另外,在我国西藏大部分地区,当海拔高度在4000m左右时,大气压力和大气中的绝对氧浓度约为平原地区的2/3,这方面的研究尚属空白,因此必须研究低压低氧环境下受限空间内火灾孕育和发展的基本规律,科学地认识低压低氧等特殊环境条件下建筑可燃物的燃烧过程和火蔓延特性。

与受限空间相比,开放空间大尺度火蔓延则受可燃物分布、地形和气象等众多复杂因素的影响。小尺度森林地表火蔓延物理模型详细考虑控制火灾过程的可燃物热解、质量与热量输运及着火过程,在模拟理论和方法上均取得显著进展。

而针对开放空间大尺度特殊火现象,包括火旋风、飞火和多火焰融合等,我国学者近年来开展了富有特色的研究工作。城市与森林交界域的火蔓延行为危害大,已成为国际火灾研究新的热点。这类火灾一般由异常天气条件下大尺度森林火所引发,形成植被-建筑离散可燃物分布条件下的快速非稳态火蔓延,并伴随树冠火、火旋风和飞火等极端火行为,通过大尺度火焰辐射和飞火引燃建筑物,危及建筑和人员安全。目前对这类大尺度火灾行为的科学认识还属初步。此外,强风条件下火灾辐射热与对流热的传递规律也有待细致研究。

总体而言,火灾科学基本理论研究呈现出的发展趋势为:①重视特殊火现象及火诱导现象的研究;②重视动力学综合模型研究;③重视直接面向需求的应用研究;④重视火灾与人、环境的相互作用。宏观与微观相结合、一般现象与特殊现象研究相结合、定性与定量相结合、分过程模型与综合模型相结合,是火灾科学基础研究方法学的总体发展趋势。

与火灾演化理论紧密结合,通过多种技术手段的多元协同以实现安全、清洁与高效的防灭火,是当前火灾防治技术发展的重要主题。火灾防治技术也将呈现以下发展趋势:①清洁阻燃、智能探测、清洁高效灭火等技术将成为新一代消防技术的主导;②基于火灾风险评估与火灾动力学的性能化防火设计方法将快速发展,成为建筑防火设计的重要组成部分;③火灾防治的传统管理技术将向以火灾动力学为基础的科学管理和应急预案技术转变。

步入 21 世纪以来,发达国家充分认识到火灾科学发展与经济发展的密切关系,不断加大对火灾研究基地的建设力度,非常重视直接面向火灾安全工程的应用需求来制定研究规划。世界火灾科学发展态势表现为:①火灾科学研究不断深化和拓展,实验室规模不断扩大;②既重视火灾过程的实验模拟和计算机模拟,又着力进行实体实验;③密切结合本国火灾安全需求,研究方向特色鲜明。

5.2.6 燃烧诊断

发展高效低污染燃烧技术是驱动燃烧诊断研究的重要源泉。燃烧诊断技术的应用范围很广,从实验室 Bunsen 火焰到工业中的大型燃烧装置都需要应用燃烧诊断技术,其最终目的是充分理解燃烧现象,并提高燃烧装置的性能。燃烧诊断技术分为接触式和非接触式,以非接触式为主,大体可分为基于激光和非激光的诊断技术,前者已成为全世界燃烧实验室的常用工具。所有物质形态,固、液、气和自由电子均可实现受激发射,产生从远红外到 X 射线的相干辐射。可调激光应用和非线性光学技术的发展,极大地扩展了燃烧光谱分析的可行性,基于激光的燃烧诊断技术已是燃烧诊断研究的主要手段^[20]。已成功应用的激光诊断技术包括:吸收光谱(absorption spectroscopy, AS)、激光消光(laser extinction, LE)、

激光干涉 (laser interference, LI)、激光诱导荧光 (laser-induced fluorescence, LIF)、激光多普勒测速 (laser Doppler velocimetry, LDV)、颗粒成像测速 (particle imaging velocimetry, PIV)、拉曼瑞利散射 (Raman and Rayleigh scattering, RRS)、相干反斯托克斯拉曼散射 (anti-Stokes Raman scattering, CARS)、激光诱导炽光 (laser-induced incandescence, LII) 等。采用这些方法, 燃烧过程中原子和分子的光谱状态可在很高的光谱、时间和空间分辨率下加以观察分析, 从而对燃烧过程中温度、速度、浓度、组分、放热率等多种热物理参数和化学组分的多维分布进行检测。激光光谱技术对非稳定组分在线诊断的优势明显, 对于稳态组分的检测也十分可靠。

非激光的诊断技术中, 基于火焰发射光谱的诊断技术在燃烧中也有着重要的应用, 包括发射光谱 (emission spectrum, ES)、化学发光 (chemiluminescence, CL)、可见光图像处理 (visible image processing)、红外热成像 (infrared thermography) 等, 其特点是不需要复杂的光学设备, 易于实现。除了基于光谱的诊断技术, 燃烧诊断技术还包括取样分析技术, 通常结合质谱、气相色谱或色-质联用等仪器, 可以对燃烧过程中的中间产物进行检测。近年来, 基于同步辐射发展起来的同步辐射-分子束谱技术 (SR-MBMS) 在燃烧诊断研究中有着重要的应用, 这是一种光谱与质谱的组合技术。燃烧过程会产生很多不同的中间产物, 其中碳氢化合物有很多同分异构体, 利用同步辐射的单光子电离技术, 可以对这些中间物、自由基、芳烃等进行研究, 通过对这些中间产物的检测, 研究者可以深入研究一些碳氢化合物的燃烧反应动力学, 从而对反应动力学模型进行修正, 解释烟黑气溶胶的形成机理等。

层流火焰常作为研究燃烧过程化学反应机理的理想对象, 包括低压、常压火焰, 以及射流和同向流动扩散火焰。这些火焰通常燃烧气体和液体燃料, 其化学反应非常复杂, 涉及上千步化学反应和上百种中间组分, 燃烧过程中温度分布和各种组分的浓度分布对于研究化学反应非常重要。例如, 对于 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{NO}$ 火焰, 已采用 AS 测量甲基、氢氧根以及氮氧化物的绝对浓度分布, 用 LIF 测量 CH 和 CN 基。湍流火焰也是燃烧基础研究的重要对象, 得到湍流火焰中各种热物理参数的时间空间分布是燃烧诊断面临的重要挑战, 如速度分布、温度分布、各种物质的浓度分布等。瑞利、拉曼散射和 LIF 诊断技术, 可很好地解决湍流-化学反应相互作用的多尺度测量。PIV 和 PLIF 可同时测量流场中一些组分的分布, 进而给出局部的瞬时火焰前沿位置。可进一步扩展这种联合 PIV 和标量测量到多维系统中, 包括若干组分、三维标量和速度场以及火焰与壁面的相互作用的同时测量。激光技术能够提供着火过程的详细实验和理论研究的理想初始条件。

燃烧系统中速度矢量场和温度、组分等标量场的联合实验测量和描述并不多

见,但却代表了评价燃烧过程数值模拟精度、理解燃烧过程的显著进步。国际上燃烧诊断技术的一个重要发展趋势是将多种诊断技术同时应用于复杂燃烧对象的诊断研究之中。例如,PIV技术用于流场结构的可视化测量;高速纹影系统(每秒1000帧)用于研究着火过程研究;LIF用于对燃料-空气混合过程进行可视化检测;基于激光的米氏散射(Mie scattering)和相位LDV技术定量检测喷雾结构和液滴尺寸分布;LII技术用于烟黑浓度份额和颗粒粒径的实时、非接触测量技术;激光散射/衰减检测技术用于烟黑容积份额、初始颗粒尺寸、集聚尺寸的检测;化学发光(CL)技术用于碳氢火焰释热率分布检测,等等。

燃烧诊断的最新进展还包括新型燃烧诊断技术的研究和发展,例如,由CMOS照相机技术、信号增强技术、高重复率激光技术的发展带来的高速成像诊断技术在燃烧诊断领域的应用;燃烧辐射发射和可调二极管激光吸收传感器(TDLAS)是越来越受到关注的诊断方法;火焰中激光吸收光谱灵敏度的进一步提高可采用光腔衰荡光谱(cavity ring-down spectroscopy, CRDS)技术,低压火焰中的HCO基已经通过CRDS从其较弱的电子吸收探测到;光致声红外光谱仪(PAS)则提供了比传统红外光谱分析更灵敏的分析技术。

激光技术被广泛应用于发动机中混合物形成、液滴和喷雾特性、流场、温度和组分分布、氮氧化物和烟黑等污染物的生成过程以及未燃尽碳氢化合物排放的研究。采用PIV技术、粒子跟踪测速(PTV)技术和LDV技术,已能准确的测量缸内气体运动规律;采用相位多普勒粒径PDA(PDPA)和激光散射粒径测量技术(LDSA)能测量出喷雾粒径大小和分布规律;高速摄影和纹影技术能测量出火焰发展和火焰面形状;用PLIF可获取混合气浓度场、燃烧过程NO和OH分布,进一步通过对火焰前锋面中间基OH、CH和C₂的发光光谱分析,较好地认识了火焰前锋面处的化学反应过程;LII解决了柴油机颗粒物测量中烟黑颗粒浓度和尺寸同时测量的问题。在混合物形成方面,基于中间基分子的发光特性,荧光诊断系统被用于进行燃料分布、混合、蒸发和流场可视化的PLIF测量的开发,已采用拉曼散射研究内燃机中混合物的形成,包括氧气、燃料、氮气和水分。激光全息干涉技术也被应用在喷雾特性的测量上,通过对柴油喷雾的紫外光和可见光两次成像,获得了燃油喷雾的液态区分布和气态区分布。火焰发射光谱技术在内燃机燃烧诊断中也有着广泛的应用,采用基于图像处理的双色测温技术能得到火焰温度图像分布;红外测温系统可获取火焰的温度分布;采用光纤光谱仪测量装置,根据光谱信息检测缸内NO浓度。

工业燃烧装置包括电力、冶金、石化等行业的锅炉、加热炉、窑炉、焚烧炉等,炉内燃烧过程发生在相对大的空间中,是脉动的、具有典型三维特征及气固两相的复杂物理化学过程,环境恶劣,给燃烧诊断带来较大困难。绝大部分工业

燃烧器的检测和控制,除了强制性的火焰管理系统外,大都基于烟气成分的分析,国际上目前对于燃烧装置的运行优化的手段很有限。工业燃烧诊断集中在对燃烧室中燃烧温度、气相组分、颗粒浓度的在线检测^[21]。CARS已被用于80MW生物质粉末燃烧锅炉的温度测量中,其目的是用于控制 NO_x 排放;CARS还被用于火箭发动机产生的高温高压火焰的温度和 H_2O 浓度的检测。尽管由于炉内尺寸较大,炉内介质对激光的衰减较强,而且高温、噪声、粉尘、振动等恶劣的环境条件给基于激光的复杂诊断系统等带来较大的影响,但激光诊断技术仍然为工业燃烧诊断描绘出美好的前景。另一个可能在工业燃烧过程中应用的激光诊断技术是LIF,该技术已成功地展示了对工业火焰中CO和 CO_2 的二维分布的测量。以原子发射光谱分析为基础构建的诊断测试系统,已用于在线监测工业燃烧气体中的有害成分,适合实验条件恶劣、高气体温度、存在粉尘和腐蚀性环境的仪器^[22]。

火灾探测是指针对火灾烟雾、气体、火焰、温度等特征参量,利用烟雾颗粒光散射、气体特征吸收、火焰辐射等现象规律,采用传感技术、信息处理、通讯传输等技术手段,对火灾现象进行及时有效识别与响应,并与报警灭火系统实现联动,从而达到火灾早期报警与扑救,减小人员伤亡及财产损失的目的。采用多种传感器复合技术、利用卫星遥感信息和先进的数据融合处理技术,提高火灾监测技术水平,是国际上火灾探测技术的发展趋势。

除了火灾探测之外,燃烧诊断技术在提高灭火剂有效性方面也能提供重要帮助。对于一种灭火剂来说,既要求快速、有效、安全的扑灭火灾,又不要对环境产生影响。而灭火剂必须是与燃料和燃烧方式无关的,目前常用的灭火剂包括水雾、 NaHCO_3 、氟化烃、含磷化合物等。燃烧诊断技术需要测量在有无这些抑制剂的情况下,火灾燃烧中液滴和颗粒的尺寸,以及其他热物理参数。用LIF可以对一些中间产物,如OH、CH等自由基进行检测,用于完善火灾化学反应数数据库。

计算机断层扫描技术(CT)结合激光技术或者辐射图像处理技术,已经越来越多地应用在实验室火焰和工业燃烧监测和诊断中。这类技术的实现途径包括,利用火焰组分分子自身对入射激光有吸收作用的吸收CT和利用火焰自身辐射的发射CT。吸收CT中,利用一定气体组分对特定波长辐射的吸收作用,采用CT处理不同角度激光光束在传递路径上的透射率分布,重构出燃烧产生的羽烟中气体组分非均匀分布。

近年来,国内燃烧学领域开始明显重视基础性燃烧诊断研究。虽然整体上我国燃烧诊断研究和国际先进水平相比差距仍然十分明显,但在跟踪国外先进的燃烧诊断研究的基础上,我国近年来已开始取得若干进展。例如,中国科学技术大

学发展的基于同步辐射的燃烧诊断技术,成功应用于燃料的热解、低温氧化和燃烧,取得了令国际同行瞩目的成果;清华大学建立了 LII 测量系统,用该系统分析了电场对火焰中炭黑颗粒聚集和分布的影响,还以此研究柴油机缸内炭黑颗粒的生成情况;浙江大学能源清洁利用国家重点实验室利用高分辨率照相机摄取发烟火焰的立体辐射图像,获得视线积分单色发射投影图像,从而重建火焰温度和烟黑浓度分布;华中科技大学采用彩色 CCD 火焰图像探测器获取大型电站煤粉炉燃烧火焰多幅辐射能图像,监测煤粉火焰辐射率,重建出燃烧火焰断面和三维温度场分布;华东理工大学煤气化教育部重点实验室采用火焰辐射图像处理技术检测了一台多火嘴气化炉的断面温度场分布,等等。

此外,复旦大学微电子系基于朗伯-比尔吸收定律建立了便携式非色散红外气体传感体系,并成功地应用于火灾现场生成气体的实时检测。南京航空航天大学自动化学院研发了基于激光诊断技术的脉冲爆震发动机多参数自动测试系统。中国科学院安徽光学精密机械研究所研究了基于 TDLAS 的火焰 CO_2 浓度检测方法,确定了 TDLAS 二次谐波检测在高温环境下的浓度反演方法,进一步将 TDLAS 技术与开放式的多次反射池相结合,并利用自平衡探测加波长调制的新型检测方法,测量了酒精喷灯燃烧过程中产生的 CO 浓度。西北核技术研究所利用 Nd:YAG 激光的三倍频激发自发振动拉曼散射技术测量了不同配比条件下的 CH_4 -空气预混火焰内的主要组分 (N_2 、 O_2 、 H_2O 、 CH_4) 及其相对浓度,并分别用分子浓度测温法和斯托克斯谱与反斯托克斯谱强度比对法测量了火焰的温度,还发展了用于火焰温度和密度测量的结合窄线宽激光器、分子过滤器以及像增强器等技术的分子过滤瑞利散射技术。哈尔滨工业大学自动化测试与控制系针对发射率随波长连续变化且平缓的火焰温度的测量,提出了一种基于遗传算法的测量发光火焰温度的方法。华南理工大学电力学院采用激光诱导击穿光谱 (laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS) 技术检测研究了燃煤飞灰中的碳含量和燃煤特性及成分。吉林大学物理学院采用 LIF 光谱技术检测研究了酒精灯、甲烷/氧气预混气体、固体推进剂三种燃烧过程中 OH 自由基的空间分布。南京理工大学信息物理与工程系提出将带滤波的叠栅偏折层析系统用于存在化学反应的燃烧火焰多组分复杂气体流场的诊断。西北工业大学航天学院使用光学诊断方法如阴影法和火焰分光光谱法检测研究了液氧和气态甲烷低温同轴喷雾燃烧试验中的喷雾和火焰信息,等等。

但 LIF、CARS、LII 等基于激光光谱的先进燃烧诊断技术光学系统复杂,需要较大的资金投入,在国内还难以普及。与国际上的研究相比,我国对这类燃烧诊断方法的研究还比较薄弱,这也是未来需要发展的方向。

发动机燃烧测量技术进展主要反映在喷雾测量、流场测量、火焰测量和燃烧

过程产物测量等方面。采用 PIV、PTV 和 LDV 技术, 已能准确的测量缸内气体运动规律, 相位 PDPA 和 LDSA 测量技术能测量出喷雾粒径大小和分布规律, 高速摄影和纹影技术能测量出火焰发展和火焰面形状, 两色法能获得清晰的火焰图像, LIF 技术可获取混合气浓度场、燃烧过程 NO 和 OH 分布, 激光技术通过对柴油喷雾的紫外光和可见光两次成像, 获得了燃油喷雾的液态区分布和气态区分布。全息技术也被应用在喷雾特性的测量上, 已开发出用于缸内辐射测量的传感器, 利用燃烧过程离子信号检测发动机的失火和燃烧状况, 红外测温系统可获取火焰的温度分布, 根据光谱信息检测缸内 NO 浓度。柴油机颗粒物测量中采用 LII 技术, 解决了颗粒质量和尺寸同时测量的问题。激光诱导荧光法的柴油喷雾两维成像技术, 通过对火焰前锋面中间基 OH、CH 和 C_2 的发光光谱分析, 较好地认识了火焰前锋面处的化学反应过程。一些新兴内燃机燃烧测量装置也已推出, 如采用光纤探针的火焰测量装置、汽油机爆震光学测量装置、燃烧火焰断层扫描装置。

燃气轮机和直喷式内燃机的设计, 需要有关燃料喷雾特性、喷雾液滴蒸发和加热行为的准确知识。准确模拟液滴中传热和蒸发以及局部浓度的努力推动了在高温、大气环境下孤立液滴的多种激光研究方法。荧光淬熄成像 (FQI) 用于阐明液滴中由剪切诱导的内部旋转, 与液相中缓慢的热扩散相比, 这增加了传热以及蒸发的速率。纯氮气和含氧气氛中下落液滴中分别发出荧光光强的比值给出了特征结构, 从这些氧气淬熄的“流线”中可以得到有关内部旋转的信息。

燃烧过程中物种的诊断方法目前主要归纳为两大类: 一类是原位光谱诊断法, 另一类是取样分析法。

光谱法的优点是在测量过程中不扰动火焰的结构。但对于不同的测量对象, 由于光谱的范围不同, 必须重新调整激光的波长, 这也是光谱法的缺点之一。光谱法非常适合于测量小分子及自由基的浓度, 如 NO、CO、OH、CH 和 CH_2 等, 然而, 在典型的燃烧温度 (500 ~ 3000K) 范围内, 大分子由于具有较大的布居函数和较小的转动常数, 导致光谱峰相互重叠而变得毫无规则, 因此光谱诊断方法无法定量地测量大分子, 如较大的碳氢化合物和多环芳烃, 而多环芳烃正是形成炭黑气溶胶的前驱体。

取样分析法通常结合质谱 (MS)、气相色谱 (GC) 或色-质联用 (GC-MS) 等仪器。取样法与质谱相结合被证明是一种有效的、普适的实验技术, 已被广泛地应用于化学、物理和生物研究领域。由于取样分析法是目前唯一能对绝大多数燃烧产物和中间体进行检测的方法, 因此它成为当前基础燃烧研究领域最常用的诊断技术。取样法在燃烧研究中的应用通常有两种: 一种是利用毛细管取样,

这种方法对火焰结构的扰动较小,缺点在于只能探测到一些稳定的分子,而无法探测自由基和一些活泼的中间产物;另一种方法是利用复杂的超声分子束进行原位取样,取样后分子无任何碰撞,可以有效地“冻结”分子和自由基,因此能准确地探测燃烧过程中产生的各种产物,包括自由基和燃烧中间产物,这种方法称为分子束质谱法(MBMS)。传统的MBMS仪器使用电子束轰击电离或激光光电离作为电离源,而这两种电离源均面临着难以克服的问题。例如,电子束轰击电离的能量分辨差,会导致大量解离碎片的产生,干扰对母体分子和其他中间产物(尤其是自由基)的探测,同时由于它很难产生10.0eV以下的电子束源,难以区分大多数同分异构体,即不具有选择性;而激光光电离也存在一些无法避免的缺点,比如激光的调谐范围较窄,在真空紫外(VUV)波段进行连续调谐极为费时费力,还可能会引起多光子电离过程等问题,难以对同分异构体和自由基等进行明确的鉴定。进入21世纪以来,通过将同步辐射真空紫外光电离和分子束质谱技术相结合,发展出了应用于燃烧诊断学的同步辐射真空紫外光电离质谱(SVUV-PIMS)技术,促进了基础燃烧学研究领域的进一步发展,完善了人们对火焰结构和燃烧化学的认识^[23]。

2002年,美国科学家在劳伦斯伯克利国家实验室的第三代同步辐射光源——先进光源(ALS)上,建立了世界上第一台同步辐射燃烧实验装置。作为20世纪50年代以后兴起的新型光源,同步辐射具有高亮度、高准直性和波长连续可调等特性,并且其VUV光电离是单光子过程,可以避免在电离时产生碎片,因此能够广泛探测燃烧产物,尤其是各种中间产物。尤其重要的是,同步辐射光的可调谐性使得该技术在探测多环芳烃过程中可以避免碎片离子峰的干扰而且能够区分火焰中大量存在的同分异构体。这是使用电子束轰击电离或激光光电离的商品化质谱难以比拟的。具体的方法是通过扫描同一个质量数的信号随光子能量的变化得到光电离效率(PIE)谱,从而确定出电离阈值的信息,对照文献中或通过量子化学计算得到的各种可能存在的同分异构体的电离能(IE),可以鉴定燃烧中间体、区分同分异构体。利用同步辐射真空紫外光电离质谱技术可以研究在燃烧过程中起关键作用的活泼自由基,如 CH_3 、 C_2H_3 、 HCO 、 C_3H_3 、 C_3H_5 、 C_5H_5 等。同时,利用同步辐射真空紫外光电离质谱技术还可以获得各中间体和主要火焰物质的浓度信息,尤其是能够分别确定各同分异构体的浓度,为发展动力学机理提供了实验基础。

国内燃烧学领域对燃烧诊断的基础性研究重视不够。除长期以来对基础研究的投入不足外,燃烧学领域长期以来只注重燃烧技术的应用研究。燃烧诊断研究主要跟踪国外先进技术,和国际先进水平相比差距明显,极大限制了燃烧基础研究水平提高和燃烧诊断新技术的开发。我国在火焰基础研究诊断技术、

工业燃烧过程检测、发动机燃烧诊断和火灾探测等若干方向开展的工作主要有以下方面。

1. 火焰基础研究中的诊断技术

1) 激光诊断技术

从 20 世纪 90 年代初期开始至今,国内持续开展激光全息干涉法燃烧火焰检测的理论和实验研究,在少数投影重建算法方面取得了多方面进展。目前,国内又有了新的发展,开始探讨用于火焰浓度场测量的差分吸收光谱 CT 和浓度场、温度场同时重建的双波长全息共振干涉 CT,将 LIF、CARS 等先进激光测试诊断技术应用于气体火焰燃烧诊断的试验研究。采用双光子激光诱导荧光 (TP-LIF) 技术测量 CO 的浓度分布;采用宽带非稳腔空间增强探测甲烷-空气预混火焰中预混火焰温度随高度的分布,火焰温度测量的不确定度小于 5%,单次测量火焰的温度和组分浓度相对误差小于 10%;利用平面激光诱导荧光技术获得了稳定燃烧场二维 OH 荧光图像,并分析了激光作用区域火焰二维温度场的分布;还包括应用 PLIF 技术诊断超声速燃烧,测取 NO 分子的系列荧光谱线及二维浓度分布,在液化石油气-空气预混火焰中进行氮分子 CARS 测温实验,采用分子基带转振光谱测温法以及分子发射光谱最大强度谱线测温法,应用遥感 FTIR 对固体推进剂燃烧火焰的温度进行研究等。燃烧火焰激光诊断技术的研究仍是我国的薄弱环节,只有根本改变这种状况,燃烧基础研究才能跨上一个新的台阶。

2) 同步辐射真空紫外光电离结合分子束取样质谱技术

2003 年,我国科研人员在位于合肥的国家同步辐射实验室建造了国内首台同步辐射燃烧实验装置,也是目前世界上仅有的两台装置之一。该装置较 ALS 的仪器具有更高的质量分辨率和灵敏度,能够应用于绝大多数气态和液态燃料火焰的研究,探测燃烧过程中的各类中间产物,为理解化石燃料燃烧过程中有害污染物(包括多环芳烃、NO_x 和 SO_x 等)的形成机理提供了依据^[24]。同步辐射真空紫外光电离质谱技术的优势在火焰里烯醇类中间体的探测中得到了体现。该工作由我国科研人员与美国和德国科研人员合作,通过对质量数为 44、58 和 72 的 PIE 谱的测量,在常见的醛类和酮类中间体的基础上,发现了乙烯醇、丙烯醇和丁烯醇等一系列活泼的烯醇类中间体的存在。该成果以封面文章的形式发表在 2005 年 6 月 24 日的 *Science* 杂志上。近年来,我国科研人员致力于扩展同步辐射真空紫外光电离质谱技术在实验燃烧领域的应用,先后取得了一系列的重大进展,如将同步辐射与射流搅拌反应器结合,发现了碳氢燃料低温氧化过程中起重要作用的过氧化物。

3) 预混层流火焰

对预混层流火焰的研究覆盖了三种最主要的燃料类型,即碳氢化合物燃料、含氧燃料和含氮燃料。碳氢化合物燃料是实用燃料的最主要组成部分,包含有烷烃、烯烃、环烷烃、聚烯烃、炔烃和芳香烃等类型。由于这些碳氢化合物燃料分子中的官能团不同,它们的火焰结构和相应的燃烧机理也有所差异。利用同步辐射真空紫外光电离质谱技术,我国科研人员对部分烷烃(正庚烷)、烯烃(乙烯)、炔烃(乙炔)和芳香烃(苯、甲苯、乙基苯和多种单环芳烃)的预混层流火焰结构进行了深入的研究,成功地探测到一系列 C_1 — C_9 的自由基,并鉴别了其中的同分异构体。同时,在芳香烃类燃料的富燃火焰中观察到了大量的芳香烃物种,包括一系列含 2~4 个苯环的多环芳烃,并检测了它们的浓度,将有助于验证现有的多环芳烃形成机理,如氢提取碳加成(HACA)机理和共轭稳态自由基加成机理等对燃烧过程中多环芳烃形成和生长的贡献。

另外,通过对芳香烃系列火焰的比较,可以发现多环芳烃的浓度随芳香烃燃料支链结构复杂性的提高而增加,这也与这些燃料的颗粒物生成趋势的规律一致。通过对中间体的鉴别,初步显示 HACA 机理可以联结一个苯环到四个苯环的芳香烃中间体,例如,一条可能的主要 HACA 路径始于苯(C_6 芳烃),经过苯乙炔等 C_8 芳烃、萘和 1,4-二乙炔基苯等 C_{10} 芳烃、二乙炔基苯和萘等 C_{12} 芳烃以及蒽等 C_{14} 芳烃,到达芘等 C_{16} 芳烃。这些路径不一定是相关芳烃的主要生成路径,但能够给予一定的启示,为完善动力学机理中的多环芳烃部分提供了线索。此外,得益于同步辐射真空紫外光电离质谱技术对同分异构体的鉴别能力,在碳氢化合物火焰中观察到了大量前人没有报道过的燃烧中间体,如上文所述的烯醇类中间体、 C_4H_3 和 C_4H_5 自由基、 C_5H_3 和 C_5H_5 自由基、大质量聚炔烃($C_{12}H_2$)和聚炔烃类 C_nH_4 分子(C_9H_4 和 $C_{10}H_4$)等,尤其对碳氢化合物火焰中的 C_1 到 C_9 系列自由基进行了全面地探测。

由于碳氢化合物燃料的大量消耗,寻找替代能源成为当前能源研究领域最为迫切的任务。生物质燃料以其资源量大、可储存、可再生以及低污染等特点,成为重要的潜在替代能源之一,同时,部分生物质燃料,如醇类等的流动和燃烧特性与化石燃料相近,可以直接或以燃料掺杂物的形式应用于目前的发动机中,在经济性和适用性上具有很强的竞争力。因此,我国研究人员开展了对生物质燃料(特别是醇类燃料)预混层流火焰的研究,包括四种丁醇、丙醇和两种丙酮等。由于醇类燃料与含有相同碳原子数的烷烃类燃料结构上的主要差异在于其羟基官能团以及由不同官能团位置衍生出的同分异构体结构,故燃料化学结构,尤其是同分异构体结构对于燃烧中间体构成的影响是这些工作的研究重点。

含氮燃料是一类重要能源,煤、石油和部分生物质燃料中都含有氮,其中又

以煤最为主要,而含氮燃料中的氮原子被氧化生成 NO 是主要的 NO_x 生成机理之一,即燃料型 NO 机理。特别是随着对 NO_x 形成机理认识的深入和先进发动机燃烧技术的使用,热力型 NO 在总的 NO 产量中的份额已大为降低,进一步突出了燃料型 NO 的重要性。因此,研究含氮燃料的燃烧,对于减少 NO_x 等含氮污染物的排放具有重要意义。国际上对含氮燃料的研究十分广泛,研究对象涉及各种实际燃料和模型燃料,研究体系覆盖了热解、氧化和燃烧过程,研究层面包括从宏观到微观的各种化学过程和物理过程。特别是对于一些重要基元反应的深入研究,完善了相关的反应模型,从根本上改变了研究者对于这些燃料燃烧过程的认识。我国研究人员通过对各类含氮燃料层流预混火焰,如杂环系列(吡咯和吡啶)、硝基烷烃系列(如硝基甲烷)和甲烷掺氮系列火焰的研究,完善了对含氮燃料火焰结构的认识,从而为发展含氮燃料燃烧动力学机理奠定了基础。

4) 流动管热解

燃烧过程主要由两部分机理组成,即热解和氧化。将热解和氧化解耦,先在无氧环境下研究较为简单的热解过程,发展出热解机理后,再加入氧化机理,便可以得到完整的燃烧动力学机理。对于热解过程的研究需使用加热仪器控制热解温度,对热解产物进行全面探测,并在合适的温度范围内研究燃料和热解产物随温度变化的趋势。但在前人的工作中,多采用电子束轰击电离或气相色谱技术对热解产物进行诊断,因此无法对热解产物,特别是自由基进行全面探测。我国研究人员首次将同步辐射真空紫外光电离质谱技术应用到流动管热解研究中,对甲基叔丁基醚(MTBE)、甲苯、苯和吡咯等燃料进行了研究,为确定热解产物、明确热解机理打下了坚实的基础。

此外,通过扫描温度可以得到燃料分解和产物生成的初始温度以及它们的浓度随温度变化的曲线,这给燃烧化学动力学研究提供了很好的实验依据。例如,对于燃料及其初步分解产物来说,分解或生成的初始温度代表了相应通道的活化能垒,因此可以验证对相应反应通道的量化计算结果的正确性;而对所有热解物种浓度曲线的模拟可以帮助验证热解动力学机理。

5) 同轴扩散火焰

低压预混火焰非常适合于动力学模型的研究,但实际燃烧过程多发生在常压或高压下,而且一般燃料与氧化剂处于非预混状态。为了研究实际情况下的燃烧行为,我国研究人员将同步辐射真空紫外光电离质谱技术拓展到对常压同轴扩散火焰的诊断之中。通过测量 PIE 谱,能够对火焰中的中间体和产物进行检测,并分析它们沿火焰的轴向和径向的浓度分布情况,目前该研究正在进行中。

上述同步辐射真空紫外光电离质谱技术的最新进展已发表于近期出版的国际

著名期刊 *Accounts of Chemical Research* [2009 年影响因子 (IF) 为 18.203] 上。有关其最新进展的文章深入总结了近几年发展的各种燃烧诊断新方法, 以及同步辐射真空紫外光电质谱技术在预混层流火焰、流动管热解、扩散火焰、催化氧化、等离子体诊断及辅助燃烧, 以及颗粒物诊断等方向获得的成功应用。

2. 发动机燃烧诊断技术

在燃烧火焰光谱检测和光纤传感器研制方面, 国内较早开展了内燃机燃烧火焰光学测量及火焰光谱分析实验, 研制成功火花塞光纤传感测量系统, 用于产品发动机的燃烧诊断, 并用光纤光谱技术、激光诱导荧光法在研究发动机燃烧过程方面取得了有价值的成果。基于平面激光诱导荧光测试技术的原理, 开发出可用于同时测量燃油气相和液相二维浓度场的测试系统, 进行了光学发动机测试实验, 研究 BUMP 燃烧室内油束撞壁混合过程, BUMP 限流沿对于促进油气快速混合的现象。还建立了一套用于火花点火发动机缸内燃烧研究的剪切干涉及高速摄影实验装置, 利用图像处理系统对拍摄到的燃烧干涉图像进行处理, 可定量得到燃烧过程气缸内的温度场, 估算出火焰传播速度。此外, 曾报道采用激光双曝光全息干涉技术测取柴油机压缩温度场, 采用高速摄影方法对不同喷射方式及喷射时刻下的火焰传播过程进行实际观测。

用于航空发动机主燃烧室和加力燃烧室、爆震发动机燃烧室、亚燃/超燃冲压发动机燃烧室内流场的非接触式诊断技术有: CARS 技术用于燃烧流场温度测量; TDLAS 技术用于燃烧流场温度和特定组分浓度在线实时测量; PLIF 技术用于流场截面二维组分分布、温度场及速度场分布测量; 激光全息、PDPA 技术用于燃料雾化液滴分布及粒径测量; 自发振动拉曼散射 (SVRS) 技术用于燃烧流场主要组分浓度测量; PIV 技术用于燃烧高温流场的速度测量; 分子滤波瑞利散射 (FRS) 技术用于燃烧高温流场的温度、速度和组分浓度测量; 光谱诊断技术用于燃烧效率的测量; 兆赫兹及以上的高速摄像用于火焰传播的测量。

3. 工业燃烧诊断技术

锅炉燃烧检测开展了基于火焰图像处理的炉内燃烧温度场检测和燃烧诊断的研究, 基本和国际先进水平相当。提出了采用双色法从彩色火焰图像中计算火焰温度图像的方法, 对火焰温度场重建、温度和浓度联合重建、基于火焰图像处理的燃烧诊断开展了深入的研究; 探讨调焦光谱层析成像技术重构火焰三维温度浓度场; 提出基于参考测温的单色法火焰温度图像检测方法, 建立了炉内燃烧火焰温度分布和火焰辐射图像之间的定量模型, 发展火焰温度场重构的 Tikhonov 正则化方法, 并开展电站锅炉炉内燃烧二维、三维温度分布在线检测的实验, 将炉内

三维温度场可视化技术应用到轧钢加热炉内燃烧可视化实验测试;已有根据火焰辐射光谱特性进行燃烧特性、温度、黑度和燃烧产物成分浓度等的检测和燃烧诊断的研究。

4. 火灾探测技术

利用图像型遥感探测技术较好地解决了大空间场所消防探测及灭火这一难题,实现了大空间建筑早期火灾的探测和三维空间定位;探讨极低浓度气体光声检测技术应用于极早期火灾气体产物的关键技术,提出一种利用光声腔和光源间“自由吸收路径”进行测量的光声气体探测系统,避免了对光源的窄带滤波要求,实现在线式的气体检测;针对可吸入颗粒(PM10)对感烟火灾探测器产生的本底效应,提出一种以气体滤波技术为基础,综合红外吸收光谱法和光声技术两种检测技术所衍生的CO探测方法,既保留了吸收光谱法的在线测量,在信号处理上也达到光声方法的灵敏度。分布式光纤温度传感器系统实质上是分布光纤拉曼光子传感系统(DOFTSS),是近年发展起来的一种用于实时测量空间温度场的光纤传感系统,具有自标定、自校准和自检测功能。光纤光栅感温火灾探测系统是以光纤作为信号的传输与传感媒体,利用布喇格光栅的温度敏感性和光的反射原理,能够实时探测沿光纤光栅感温点的温度变化情况,超限时能声光报警。该系统检测灵敏度高,可进行分布测量,测量点可在5km范围内任意设置,现场无电检测,本质安全防爆、抗电磁干扰、防雷击,特别适合石油、天然气管道、化工、冶金、电力、消防、能源、仓储、军工、核工业等场所使用。

5.2.7 论文发表情况分析

燃烧学主要包含燃料与燃烧两大部分,尽管燃料研究的范畴远不止燃烧特性,但燃烧的研究与燃料密切相关。所选择的以燃烧为主的国际刊物包括四种:*Proceedings of the Combustion Institute*, *Progress in Energy and Combustion Science*, *Combustion and Flame*, *Combustion Science and Technology*。所选择的以燃料为主的国际刊物包括三种:*Fuel*, *Energy and Fuels*, *Fuel Processing Technology*。火灾科学方面的国际刊物主要选择了以下两种:*Fire Safety Journal*, *Journal of Fire Sciences*。在内燃机燃烧方面,除了以上燃烧和燃料方面的国际刊物发表内燃机燃烧方面的论文外,还将*Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME*这两种刊物包含在统计范围内。表5.1给出了以上11种燃烧学主要国际刊物2004年、2009年影响因子的变化对比。从表5.1中可见,所有期刊的影响因子均有所增长,影响因子2.0及以上的期刊从2004年的一种

增加到2009年的六种。

表 5.1 11 种燃烧学主要国际刊物 2004 年、2009 年影响因子变化对比

排序	刊物名称	影响因子	
		2004 年	2009 年
1	<i>Progress in Energy and Combustion Science</i>	2.844	11.024
2	<i>Fuel</i>	1.368	3.179
3	<i>Energy and Fuels</i>	1.344	2.319
4	<i>Fuel Processing Technology</i>	1.149	2.321
5	<i>Combustion and Flame</i>	1.023	2.923
6	<i>Proceedings of the Combustion Institute</i>	0.683	3.256
7	<i>Combustion Science and Technology</i>	0.568	1.142
8	<i>Fire Safety Journal</i>	0.500	1.259
9	<i>Journal of Fire Sciences</i>	0.456	0.860
10	<i>Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering</i>	0.266	0.402
11	<i>Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME</i>	0.213	0.635

由于一些论文由多国或者多单位作者合作完成,利用 EI Compindex 检索很难加以区别,故发表论文的国家或地区可能有重复统计。以下结果能反映中国内地在燃烧学 11 种主要国际刊物上发表论文的基本态势,仅供参考。

需要提到的是, *Proceedings of the Combustion Institute* 比较特殊。国际燃烧会议为隔年举行,论文集于会后下一年度出版。近 10 年里的 6 届会议论文集的出版日期分别为 2000 年(第 28 届),2002 年(第 29 届),2005 年(第 30 届),2007 年(第 31 届),2009 年(第 32 届),2011 年(第 33 届)。其中 2000 年及以前收录在 *Symposium (International) on Combustion* 中,其 ISSN 编号为 0082-0784;2002 年之后收录在 *Proceedings of the Combustion Institute* 中,其 ISSN 编号为 1540-7489。为了便于跟其他杂志的统计数据作对比,将该论文集在 2000 年、2002 年、2005 年度的数据统计到 2001~2005 年,将其在 2007 年、2009 年、2011 年度的数据统计到 2006~2010 年度。

2006~2010 年,全世界在表 5.1 所列的 11 种国际刊物上发表论文 10936 篇,其中发表论文总数排名前 20 位的国家或地区所发表论文的数量、所占百

分比如表 5.2 所示。从表 5.2 中可见,与 2001 ~ 2005 年相比,美国仍是本领域研究的超级强国,发表论文数占全部论文总数的 24.8%;中国内地超过日本和英国位居第二,占 15.9%。这表明,近几年来,随着我国政府在科研上的大力投入,我国内地在燃烧学学科领域的研究力量有明显增长,研究产出在世界的总量中已居于重要地位。英国仍排在第三,占 8.3%;日本则下降至第四位,占 6.4%。

表 5.2 11 种国际刊物上发表论文前 20 位的国家和地区

2001 ~ 2005 年				2006 ~ 2010 年			
名次	国家或地区	论文数	百分比/%	名次	国家或地区	论文数	百分比/%
1	美国	1995	28.3	1	美国	2707	24.8
2	日本	743	10.5	2	中国内地	1737	15.9
3	英国	670	9.5	3	英国	909	8.3
4	中国内地	584	8.3	4	日本	698	6.4
5	法国	355	5.0	5	加拿大	591	5.4
6	西班牙	326	4.6	6	法国	564	5.2
7	德国	321	4.6	7	西班牙	471	4.3
8	加拿大	302	4.3	8	德国	445	4.1
9	澳大利亚	296	4.2	9	韩国	443	4.1
10	韩国	279	4.0	10	澳大利亚	388	3.5
11	意大利	191	2.7	11	印度	324	3.0
12	瑞典	175	2.5	12	意大利	290	2.7
13	土耳其	149	2.1	13	瑞典	271	2.5
14	印度	133	1.9	14	土耳其	218	2.0
15	波兰	111	1.6	15	巴西	210	1.9
16	中国台湾	100	1.4	16	中国台湾	183	1.7
17	荷兰	82	1.2	17	荷兰	154	1.4
18	丹麦	77	1.1	18	希腊	136	1.2
19	希腊	73	1.0	19	伊朗	132	1.2
20	俄罗斯	71	1.0	20	俄国	111	1.0

中国内地在所选 11 种国际刊物上发表论文的比例情况,如表 5.3 所示。从表 5.3 中可以看出,与 2001 ~ 2005 年相比,近 5 年中国内地在燃料类国际刊物上发表论文增长最大,在燃烧类国际刊物上发表论文也有所增加。

表 5.3 中国内地在 11 种国际刊物发表论文比例汇总

排序	刊物名称	比例/%	
		2001 ~ 2005 年	2006 ~ 2010 年
1	<i>Journal of Fire Sciences</i>	32.5	36.5
2	<i>Fuel Processing Technology</i>	17.9	25.3
3	<i>Fuel</i>	13.3	15.3
4	<i>Energy and Fuels</i>	10.9	23.9
5	<i>Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering</i>	10.6	17.2
6	<i>Fire Safety Journal</i>	8.5	13.0
7	<i>Combustion Science and Technology</i>	4.1	6.2
8	<i>Combustion and Flame</i>	2.2	5.7
9	<i>Journal of Engineering for Gas Turbines and Power</i>	1.8	5.8
10	<i>Progress in Energy and Combustion Science</i>	1.3	4.8
11	<i>Proceedings of the Combustion Institute</i>	0.9	6.4

燃料类三种国际刊物的情况如下：中国内地、美国分别以 21.3%、15.8% 占据前二，加拿大和日本同时以 6.4% 排在第三、第四。中国内地已超过美国和日本，成为第一。这是因为中国以化石燃料为主要一次能源，随着经济的发展对燃料的需求也在不断增加，开展对燃料的研究是实现清洁高效利用的重要途径之一。三种燃料类国际刊物是中国内地发表本领域论文的主要源刊。

在火灾科学的两种国际刊物上，发表论文在前三位的国家和地区依次是：美国、中国内地、英国，它们发表论文的比例分别为：22.3%、19.8%、17.7%。中国内地排名第二，国际地位较高。

在动力机械方面的两种国际刊物上，发表论文排在前十位的依次是：美国、英国、中国内地、韩国、德国、意大利、加拿大、日本、印度和法国，发表论文的比例分别为 29.5%、13.5%、10.7%、9.6%、6.2%、6.2%、4.9%、4.7%、3.7% 和 3.4%。相对于 2001 ~ 2005 年，中国上升到第三位。10 年间，韩国汽车工业发展迅速，在这两种动力机械国际刊物上发表论文的比例始终位列前四，反映了活跃的发动机应用基础研究对于相关工业发展的支撑作用。

2006 ~ 2010 年，我国内地在反映燃烧学基础研究水平的燃烧学四种国际刊物上发表论文的数量相对于 2001 ~ 2005 年有所增加，进入世界前十名之列。美

国占到全部燃烧学论文的42.5%，排名第一。法国、英国、德国、日本发表的论文分别占10.3%、9.2%、7.7%、7.5%，分列第二到第五。排名第六到第十的分别是：中国内地、加拿大、澳大利亚、意大利、瑞典。我国内地发表论文167篇，占全部论文的6.1%，排名第六。在综述性刊物 *Progress in Energy and Combustion Science* 上，我国内地发表5篇论文，占该刊物全部论文数的4.8%。在国际燃烧学会会志（国际燃烧学会论文集）*Proceedings of the Combustion Institute* 上发表论文75篇，占该刊发表论文数的6.4%。在 *Combustion and Flame* 上发表论文57篇，占该刊发表论文的5.7%。在 *Combustion Science and Technology* 上发表论文30篇，占该刊发表论文的6.2%。与2001~2005年相比，在上述燃烧类国际刊物上，我国内地学者发表的论文都有不同程度的增加，特别是在 *Proceedings of the Combustion Institute* 和 *Combustion and Flame* 上发表论文增长幅度较大。2010年8月在北京清华大学举办的第33届国际燃烧会议上，中国内地发表论文总数位居美国、日本之后，排名世界第三。这表明，我国内地在燃烧学基础研究方面与发达国家的差距在缩小，增强了我国燃烧学界广大科学工作者进一步提高我国燃烧学基础研究水平，早日进入世界先进行列的信心。

5.3 科学问题及优先资助领域

5.3.1 基础燃烧理论

燃烧理论在未来燃烧技术、火灾防治技术，特别是各种新型燃烧技术的发展中将起到越来越大的支撑作用。为了提高我国在燃烧技术与火灾防治技术上的创新能力，需要进一步重视燃烧理论的研究，加大对燃烧理论研究的支持力度。大力发展能对各种复杂燃烧过程进行合理的理论描述、考虑各种复杂因素相互作用的燃烧理论模型，持续不断地提高各种燃烧理论模型数值模拟的准确性，同时还应重视发展各种新的燃烧数值模拟方法。

根据我国的国情和在能源开发利用等领域面临的重大需求，今后一段时期内我国燃烧理论研究的主要发展目标为：以燃烧化学反应动力学和湍流多相流动与燃烧理论研究为重点，进一步发展并完善燃烧理论体系，为高效低污染燃烧技术、航空航天推进技术、火灾防治技术和新概念燃烧技术的发展提供理论支撑。

燃烧理论研究方面优先资助的领域为：

- 1) 低碳燃料层流燃烧与化学反应动力学
 - (1) 低碳燃料和含氢燃料层流燃烧速率的测量；
 - (2) 低碳燃料和含氢燃料火焰稳定性机理研究；

- (3) 低碳燃料和含氢燃料化学反应动力学机理;
- (4) 低碳燃料和含氢燃料火焰中间体检测与有害排放物形成机理研究;
- (5) 火焰动力学和非线性分析。
- 2) 低碳燃料和混合燃料着火特性和着火延迟期研究
 - (1) 低碳燃料和混合燃料着火与熄火机理;
 - (2) 低碳燃料和混合燃料着火延迟期;
 - (3) 低碳燃料和混合燃料的氧化机理与化学反应路径。
- 3) 燃烧化学反应动力学和层流燃烧的研究
 - (1) 煤、生物质、废弃物和各种固体可燃物热解与燃烧反应动力学;
 - (2) 气体燃料燃烧及化学反应动力学机理;
 - (3) NO_x 生成的详细化学反应动力学机理;
 - (4) 炭黑生成的详细化学反应动力学机理;
 - (5) 详细化学反应动力学机理的简化方法研究;
 - (6) 层流火焰与各种物理因素的相互作用;
 - (7) 新型生物质燃料的详细化学反应动力学机理。
- 4) 湍流-复杂化学反应相互作用的理论研究
 - (1) 湍流-复杂化学反应相互作用的理论模型研究;
 - (2) 湍流-复杂化学反应相互作用的高效模拟算法。
- 5) 湍流多相燃烧的理论模型研究
 - (1) 颗粒多相燃烧与反应机理的理论描述;
 - (2) 湍流-颗粒反应相互作用的理论模型;
 - (3) 湍流-多相污染反应相互作用的理论模型;
 - (4) 湍流多相反应流中颗粒-颗粒相互作用模型;
 - (5) 稠密颗粒多相反应流中湍流-颗粒之间与颗粒-颗粒之间相互作用的统一理论描述。
- 6) 湍流燃烧与湍流多相燃烧的大涡模拟和直接数值模拟研究
 - (1) 湍流燃烧的大涡模拟;
 - (2) 湍流-化学反应相互作用的亚格子湍流燃烧模型;
 - (3) 湍流燃烧的直接数值模拟;
 - (4) 湍流多相燃烧的大涡模拟和直接数值模拟;
 - (5) 湍流燃烧和湍流多相燃烧大涡模拟与直接数值模拟中的高效高精度算法。
- 7) 爆震燃烧模式理论研究
 - (1) 缓燃向爆震模式转变 (DDT) 距离及时间的预测模型研究;

- (2) 爆震燃烧能量转换与利用方法研究;
- (3) 爆震燃烧波与前导激波的耦合机理与影响因素研究;
- (4) 爆震传播模式及影响因素研究;
- (5) 爆震波起爆机理和新型起爆方法研究;
- (6) 爆震控制方法与约束条件研究;
- (7) 超声速气流中气动结构起始逆流传播正爆震波及驻定斜爆震波机理研究;
- (8) 各种模态爆震波间的模态转换方法及控制因素研究;
- (9) 驻定斜爆震燃烧机理与实现方法研究;
- (10) 连续旋转爆震燃烧机理与实现方法研究;
- (11) 爆震燃烧时湍流和激波相互作用;
- (12) 激波-湍流-化学反应流物理特性相互作用;
- (13) 激波诱导爆震波的机理研究;
- (14) 斜激波诱导触发斜爆震波燃烧以及驻定条件的关键机理;
- (15) 圆锥驻定爆震波的波阵面结构与反应诱导区的关系研究。
- 8) 燃烧理论在工程实际燃烧问题中的应用研究
 - (1) 煤粉燃烧、流化床燃烧与生物质燃烧的数值模拟;
 - (2) 内燃机与航空航天发动机燃烧的数值模拟;
 - (3) 火灾过程的基础理论与数值模拟;
 - (4) 新概念燃烧和新型燃烧与污染控制装置的数值模拟;
 - (5) 实际燃烧反应系统内燃烧不稳定性与临界现象的理论与数值模拟;
 - (6) 金属粒子(铝、硼)在不同气氛环境下的燃烧机理和释热规律;
 - (7) 考虑固体推进剂三维结构的细观燃烧模型;
 - (8) 火箭发动机燃烧不稳定机理和控制方法;
 - (9) 高速来流条件下碳氢燃料的化学动力学;
 - (10) 超音速燃烧室湍流与化学动力学的相互作用;
 - (11) 超燃冲压发动机燃烧室中常规等压燃烧转爆震燃烧机理研究。

5.3.2 燃烧化学反应动力学

21 世纪是能源的世纪,也是环保的世纪。为了应对即将来临的能源危机,保护日益脆弱的环境,一方面需要大力开发高效、洁净的新能源,另一方面则要合理利用剩余的常规能源,特别是主要用于燃烧的化石能源,包括煤、石油和天然气等,在提高燃烧效率的同时达到对污染物排放的控制。这些都需要加强对燃烧学领域,尤其是燃烧学基础研究领域的重视。目前,燃烧化学动力学研究的重

点基础问题包括:

- (1) 不同温度、不同压力下各种基元反应速率常数的实验和理论研究;
- (2) 各种碳氢燃料、生物质燃料、含氮燃料的热解、氧化和燃烧的详细动力学模型,尤其是大的碳氢燃料如芳香烃的动力学模型等;
- (3) 固体推进剂的热解和详细化学反应动力学模型研究;
- (4) 吸热型碳氢燃料的热解和详细化学反应动力学模型研究;
- (5) 金属粒子(铝、硼)详细化学反应动力学模型研究;
- (6) 新型高能物质的燃烧机理和化学动力学模型研究;
- (7) 航空替代燃料的热解、氧化和燃烧动力学模型;
- (8) 新燃烧技术中的动力学模型,如有助于提高燃烧效率和降低燃烧污染物的辅助燃烧技术,催化辅助燃烧、等离子体辅助燃烧、氢气辅助燃烧中的动力学模型;
- (9) 详细动力学模型的简化及基于动力学的燃烧模型等;
- (10) 发展具有自主知识产权的动力学模型计算方法和计算软件。目前所有的动力学模型计算软件都是商品化的软件,没有一个是我国自己开发的,希望在未来10年内发展中国自己的方法与软件。

5.3.3 气液燃料燃烧

我国气液燃料燃烧应主要围绕内燃机燃烧、航空发动机燃烧和特种发动机燃烧方面开展创新性和基础性的研究工作。

1) 内燃机燃烧

现代内燃机燃烧总体趋势是向“均质压燃、低温燃烧”方向发展,柴油机与汽油机的燃烧特征和内涵向趋于一致的方向发展,即采用缸内多次喷油混合气制备方式、高进气增压、EGR控制的高预混合低温燃烧过程。此外,燃烧边界条件的灵活控制,包括可变气门定时和升程、可变增压和灵活喷油控制,实现包括发动机燃料与运行边界条件的灵活控制。主要科学问题包括:燃油与空气快速混合及缸内分层混合气浓度控制;燃烧过程全程混合气浓度、成分与温度历程控制(燃烧路径控制);极限条件下(稀燃、高密度燃烧)的燃烧机理及燃烧反应速率控制;燃烧路径控制条件下燃烧机理、燃烧中间产物生成、有害产物生成机理及其在缸内的演变规律;燃烧化学反应时间尺度与湍流混合时间尺度耦合;内燃机燃烧反应动力学过程及动力学模型;内燃机燃烧数值模拟;宽馏分燃料的高效清洁燃烧及燃料特性评价,宽馏分燃料设计及燃料特性评价;缸内湍流场演变规律,湍流燃烧规律,混合燃烧火焰发展与演变规律。

2) 清洁代用燃料发动机燃烧

燃料的多元化是内燃机发展的重要趋势,清洁代用燃料发动机燃烧包括以下几个方面:①天然气作为最为现实的替代燃料,天然气发动机的燃烧得到日益重视,天然气发动机主要以点燃方式或均质压燃与点燃方式组成的混合燃烧模型,缸内直喷天然气发动机是其发展方向,其重点研究领域包括缸内高压喷射的气体燃料发动机燃烧理论与燃烧控制、天然气/氢气混合燃料发动机燃烧理论与燃烧控制、火焰特征与演变规律、燃烧化学反应动力学及燃烧过程数值模型。②煤基或其他潜在的石化燃料(如油页岩、油砂)合成燃料油发动机和燃料特性评价,包括煤制柴油(GTL)、二甲醚和醇类燃料高效清洁燃烧基础理论问题及燃料特性评价,重点研究领域涉及燃料的燃料喷雾、混合气形成与演变规律、缸内浓度场和温度场的演变规律、含氧燃料的燃烧促进机理、燃烧污染物的形成机理及其在缸内的演变规律、燃烧过程的化学反应动力学过程、燃烧过程的数值模型和发动机优化控制。③生物质燃料高效清洁燃烧理论。随着石化燃料资源日益紧张,生物质燃料会得到越来越广泛的应用,目前应用最为广泛的是生物乙醇和生物柴油。生物质燃料一般都含有氧,从生物质燃料供应的角度,与传统石化燃料混合使用更为现实。因此,生物质燃料研究重点包括生物质燃料和含氧混合燃料发动机燃烧基础理论及燃烧控制,含氧生物质燃料设计,生物质燃料有害排放产物生成及演化等。此外,探索新的、全生命周期低碳排放的新型生物质燃料是未来生物质燃料重要发展方向,如最近出现的生物丁醇、生物呋喃等,需要对这些新型生物质燃料高效清洁燃烧基础理论问题开展研究,同时生物质燃料全生命周期碳迁移及排放、能量增益、对生态以及对环境的影响与是新型生物质燃料研究的重要内容之一。

3) 内燃机余热利用的相关基础问题

围绕内燃机废气余热利用技术,将推动学科交叉研究,包括:新型组合可变热力循环理论和技术、内燃机能源动力系统能源的梯级利用、多能源动力系统控制技术、强化换热、新型高效热电材料以及高效转化技术;动力涡轮-机械力组合系统技术、排气动能梯级组合效率优化理论和技术等。

4) 航空及特种燃烧发动机燃烧

脉冲爆震发动机、超燃冲压发动机和火箭冲压组合发动机重点解决的是稳定着火问题和燃烧稳定性问题,涉及燃烧室结构、高速气流下的燃料喷射、混合气形成、着火、火焰传播和稳定。实验研究可以揭示燃烧过程的基本现象和提升研究水平,数值模拟计算有助于阐明流动与燃烧过程的细节并提供设计指导准则,缩短试验和研制周期。

气液燃料燃烧方面优先资助研究领域为:

1) 内燃机燃烧理论与燃烧控制

- (1) 高效低污染内燃机燃烧理论与污染物控制;
 - (2) 瞬态工况燃烧规律及污染物控制;
 - (3) 均质混合气压燃着火燃烧理论与数值模拟;
 - (4) 非均质混合气压燃着火理论与控制;
 - (5) 内燃机后处理技术及相关基础研究;
 - (6) 喷雾与内燃机燃烧诊断;
 - (7) 内燃机节能理论与关键技术。
- 2) 石油替代燃料发动机燃烧与排放基础理论
- (1) 煤基合成燃料油发动机燃烧基础理论及发动机关键技术;
 - (2) 生物质燃油发动机燃烧基础理论及发动机关键技术;
 - (3) 清洁混合燃料的设计理论与发动机燃烧、排放基础理论。
- 3) 燃气轮机燃烧基础理论与燃烧控制技术
- (1) 燃油雾化改进方法及低 NO_x 燃烧器;
 - (2) 燃烧基础理论、催化燃烧及燃烧过程数值模拟;
 - (3) 微型燃气轮机中的燃烧组织与燃烧控制技术。
- 4) 航空及特种燃烧发动机理论及相关基础
- (1) 爆震发动机中爆震波能量充分提取与利用策略研究;
 - (2) 吸气式爆震发动机的爆震压力前传抑制及进气道内波的相互作用;
 - (3) 脉冲爆震发动机中流动与燃烧的数值模拟计算;
 - (4) 高性能极紧凑燃烧室中气流结构与燃烧过程的相互作用研究;
 - (5) 超临界环境中多组分燃料雾化、蒸发、混合、燃烧的机理和建模, 喷雾结构与火焰结构;
 - (6) 极度贫油燃烧动力学、火焰热声耦合及其控制;
 - (7) 基于超紧凑燃烧 (UCC) 的涡轮叶间燃烧 (TIB) 技术;
 - (8) 组合发动机宽来流条件的燃烧机理和燃烧规律;
 - (9) 火箭发动机热声耦合燃烧不稳定机理与规律;
 - (10) 固体推进剂的压强耦合响应机理和模型;
 - (11) 固体推进剂的细观燃烧模型;
 - (12) 超燃冲压发动机超声速气流中点火和火焰稳定机理研究;
 - (13) 超燃冲压发动机不同燃烧模态转换机理研究;
 - (14) 超燃冲压发动机激波、燃烧与附面层相互作用机理研究;
 - (15) 超声速气流中油气快速雾化混合机理及增混技术研究;
 - (16) 超燃冲压发动机燃烧室火焰稳定的贫富油极限研究;
 - (17) 超声速气流中提高燃烧效率的方法研究。

5) 微尺度、微重力燃烧基础理论及其控制

- (1) 微尺度燃烧基础理论及其控制;
- (2) 微重力燃烧规律及相关基础理论;
- (3) 微爆震燃烧实现机理和传播模式研究;
- (4) 微尺度条件下液滴燃烧理论。

5.3.4 固体燃料燃烧

重点支持的出发点应基于燃烧理论研究的国际发展趋势和围绕解决我国重大需求的先进清洁燃烧与诊断技术而进行布局。基础理论方面的研究要为认识燃烧现象、探索基础问题和开发先进燃烧技术提供支撑, 力争走在国际前列。先进清洁燃烧与诊断技术要为节能与环保发挥重要作用。

重点支持方向如下:

1) 煤的燃烧

基于煤的高效清洁燃烧, 研究煤粒在不同燃烧系统中的物理化学结构变化, 对化学结构及其演变的热转化过程动力学进行定量描述; 研究煤粒在不同燃烧系统中的化学反应机理和特性, 对煤粒在不同燃烧系统中的化学反应途径, 尤其是污染物反应途径进行精确描述; 研究煤粒在不同燃烧系统中化学反应、流动、传热传质三方面影响因素的耦合机制。

2) 燃煤污染物的形成机理和控制技术

基于常规燃煤方式, 研究 SO_x 、 NO_x 、 CO_2 、重金属、颗粒物等燃煤污染物的形成机理及其相关作用、相互影响机制; 针对常规燃煤电站, 以 PC-FGD 技术为基础, 开展、完善多种污染物的一体化脱除和控制技术的基础研究; 开展燃煤污染物形成过程的化学动力学基础研究、燃煤污染物及其健康效应研究。

3) 基于煤炭的高效清洁利用技术

针对氧/燃料燃烧、IGCC 和 PFBC 等燃煤方式, 开展可行的包含煤气化、液化及多联产在内的煤资源化利用技术的基础研究; 开展经济、可行的 CO_2 捕集和封存技术的基础研究。

4) 其他固体燃料的高效燃烧及利用

基于提高生物质单位体积的能量密度, 开展生物质气化、液化等高效利用及转化的基础研究; 针对城市固体废弃物开展高值化利用、无害化处理及资源化利用的基础研究; 开展特种发动机用高退移速率含石蜡燃料燃烧基础理论研究; 开展贫氧固体推进剂燃烧机理及高效燃烧技术研究。

5) 固体燃料燃烧及利用过程的理论及数值计算

深入开展固体燃料燃烧化学反应机理的研究; 考虑湍流、化学反应相互作用

下的固体燃料燃烧与利用过程的数值模拟。

6) 微尺度条件下固体燃料燃烧理论及控制

- (1) 微尺度固体燃料燃烧基础理论及其控制;
- (2) 微尺度条件下固体推进剂燃烧。

5.3.5 火灾燃烧

作为一门应用基础学科,我国社会发展过程中的火灾安全需求引导着火灾科学研究的发展方向。新世纪以来,我国的火灾形势较为严峻,火灾现象也表现出新的特点,主要有:①城市化发展使火灾发生更为集中。②可燃物种类不断变化。大量新型材料(如建筑外墙保温材料)的使用,燃烧形式和燃烧产物更加复杂,火灾有毒有害气体的问题也日益突出。③诱发火灾的因素大大增加。各种新的能源利用形式和电器产品的出现,导致火灾的诱发因素更为复杂、多样和隐蔽。④火灾防治困难加大。城市建筑密集,高层建筑和综合体建筑的不断增多,使得火灾防治、扑救、人员疏散等条件恶化。⑤火灾环境多样化和复杂化。从地面到地下(如地铁、隧道等),从陆地到水上(如舰船、海上钻井)和天空(如飞行器、航天站),从固定建筑到移动结构(如列车)等均有火灾的发生,而且绿地/林区与建筑火灾也会耦合。

尽管火灾科学已在受限空间火灾动力学规律及建筑火灾风险评估理论体系上取得了长足进展,但是对城市高层建筑和地下工程火灾动力学机制研究仍然不够充分,也缺乏有效的火灾控制技术。同时对特殊环境下火灾的基础研究整体十分缺乏,如高原条件下的火灾演化、微重力条件下的火灾规律、强风条件下的火灾动力学过程等。

基于以上分析,我国火灾科学的重点支持方向主要应包括:

1) 火灾演化基础研究

- (1) 复杂建筑[如城市综合体、(超)高层建筑、地下空间等]火蔓延和烟气输运的机制与规律;
 - (2) 开放空间大尺度火灾的发展与突变规律;
 - (3) 低压强对流、强风、强变热流、高原、微重力等特殊环境和条件下火灾防治的热物理基础问题;
 - (4) 能源开采、储运、转化和利用中的火灾基础科学问题。
- #### 2) 火灾防治关键技术基础研究的热物理问题
- (1) 协效阻燃新材料的热物性与燃烧性能;
 - (2) 多元协同火灾控制技术原理。

5.3.6 燃烧诊断

我国燃烧诊断研究要借鉴发达国家的先进经验,尽快弥补研究条件和技术上的差距,力争在最短的时间内,基本达到国际研究前沿水平;同时还要结合国情和已有基础,在若干关键方向集中人力和物力资源,异军突起,在燃烧基础研究国际学术舞台上占据一席之地。燃烧诊断研究优先资助领域为:

(1) 在层流火焰的氮氧化物、炭黑等污染物生成方面,开展具有特色的基于激光检测、光谱检测的燃烧诊断。

(2) 发展基于现代分析工具的非原位诊断技术,包括色谱、质谱、色谱-质谱联用技术等,以及新型的光电离质谱、分子束质谱等。

(3) 发展新的燃烧诊断技术,包括 X 射线瞬时成像技术和 X 射线小角/广角散射等原位技术。

(4) 火焰基础研究中燃烧反应及炭黑等污染物生成燃烧诊断基础研究。

①基于同步辐射的燃烧诊断及反应动力学机理研究;

②基于 LIF、CARS、激光干涉等的燃烧诊断研究;

③基于 LII 及发射光谱分析的图像处理燃烧诊断研究。

(5) 工业燃烧过程及新型燃烧装置的燃烧诊断技术研究。

①新型燃烧方式如 Oxy-fuel 燃烧方式的燃烧诊断技术研究;

②生物质、垃圾燃烧及煤气化过程燃烧诊断技术研究;

③高效低污染燃烧优化基础的基础理论和新技术研究;

④非稳态高温高压爆震燃烧环境的在线燃烧诊断技术研究;

⑤亚燃/超燃冲压发动机的在线燃烧诊断技术;

⑥微型燃烧器的在线燃烧诊断技术。

参 考 文 献

- [1] 周力行. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论及数值模拟. 北京: 科学出版社, 1994: 123—156.
- [2] Miller J A, Bowman C T. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion. Progress in Energy and Combustion Science, 1989, 15(4): 287—338.
- [3] McEnally C S, Pfefferle L D, Atakan B, et al. Studies of aromatic hydrocarbon formation mechanisms in flames: Progress towards closing the fuel gap. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(3): 247—294.
- [4] 郑楚光, 徐明厚, 张军营, 等. 燃煤痕量元素的排放与控制. 武汉: 湖北科技出版社, 2002: 45—86.

- [5] Brewster B S, Cannon S M, Farmer J R, et al. Modeling of lean premixed combustion in stationary gas turbines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1999, 25(4): 353—385.
- [6] Sankaran R, Hawkes E R, Chen J H, et al. Structure of a spatially developing turbulent lean methane-air Bunsen flame. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(1): 1291—1298.
- [7] Miller J A, Kee R J. Chemical kinetics and combustion modeling. *Annual Reviews in Physical Chemistry*, 1990, 41: 345—387.
- [8] 中国汽车工程研究院. 中国柴油汽车技术战略研究报告. 2007: 89—145.
- [9] 杨嘉林. 车用汽油发动机燃烧系统的开发. 北京: 机械工业出版社, 2009: 26—66.
- [10] 王建昕. 高效车用汽油机的技术进步. *内燃机学报*, 2008, 26(增刊): 83—89.
- [11] U. S. Department of Energy. Basic research needs for clean and efficient combustion of 21st century transportation fuels. October, 2006. http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/CTF_rpt.pdf.
- [12] 苏万华. 高密度-低温柴油机燃烧理论与技术的研究与进展. *内燃机学报*, 2008, 26(增刊): 1—8.
- [13] Dec J E. Advanced compression-ignition engines-understanding the in-cylinder processes. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 2727—2742.
- [14] Yao M F, Zheng Z L, Liu H F. Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, 35(5): 398—437.
- [15] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 学科发展战略研究报告(2006—2010年)—工程热物理与能源利用. 北京: 科学技术出版社, 2006: 146—203.
- [16] 黄佐华, 蒋德明, 王锡斌. 内燃机燃烧研究及面临的挑战. *内燃机学报*, 2008, 26(增刊): 101—106.
- [17] “十五”国家高技术发展计划能源技术领域专家委员会. 能源发展战略研究. 北京: 化学工业出版社, 2004: 98—146.
- [18] 范维澄, 等. 火灾风险评估方法学. 北京: 科学出版社, 2004: 265—296.
- [19] Moghtaderi B. The state-of-the-art in pyrolysis modelling of lignocellulosic solid fuels, *Fire and Materials*, 2006, 30(1): 1—34.
- [20] Huang Q X, Wang F, Liu D, et al. Reconstruction of soot temperature and volume fraction profiles of an asymmetric flame using stereoscopic tomography. *Combustion and Flame*, 2009, 156(3): 565—573.
- [21] Lou C, Zhou H C, Yu P F, et al. Measurements of the flame emissivity and radiative properties of particulate medium in pulverized-coal-fired boiler furnaces by image processing of visible radiation. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 2771—2778.
- [22] 周怀春. 炉内火焰可视化检测原理与技术. 北京: 科学出版社, 2005: 103—132.

- [23] Smyth K C, Crosley D R. Detection of minor species with laser techniques // Kohse-Höinghaus K, Jeffries J B. Applied Combustion Diagnostics. New York: Taylor & Francis, 2002: 9—30.
- [24] Taatjes C A, Hansen N, McIlroy A, et al. Enols are common intermediates in hydrocarbon oxidation. Science, 2005, (308): 1887—1889.

第6章 多相流

6.1 学科内涵、学术意义与应用背景

多相流学科研究具有两种以上不同相态或不同组分的物质共存并有明确分界面的多相流体流体力学、热力学、传热传质学、燃烧学、化学和生物反应以及相关工业过程中的共性科学问题,它是一门从传统能源转化与利用领域逐渐发展起来的新兴交叉科学,是能源、动力、核反应堆、化工、石油、制冷、低温、可再生能源开发利用、航空航天、环境保护、生命科学等许多领域实现现代化的重要理论和关键技术基础,在国民经济的基础与支柱产业及国防科学技术发展中有不可替代的巨大作用。同样在自然界及宇宙空间、人体及其他生物过程也广泛存在多种复杂的多相流,如地球表面及大气中常见的风云际会、风沙尘暴、雪雨纷飞、泥石流、气蚀瀑幕;地质、矿藏的形成与运移演变;生命的起源与人类健康发展;生态与环境的变迁、保护、可持续开发利用等,均普遍遵循多相流科学的基本理论与规律。因此,多相流科学的发展与进步对国民经济与国防科技发展、人体健康,对生态与环境的变迁、保护、可持续开发利用等均具有极为重要的意义^[1]。

多相流学科不但是与物质结构及基本粒子等纯数理科学、化学、生命科学等同样重要的基础科学,而且是在联结人类活动的有序化及目的化方面更具有特殊优势的学科。多相流及其传热传质学属于技术基础科学范畴,旨在解决工程所具有的普遍性热物理科学问题,是联系工程和基础理论的桥梁^[2]。多相流学科的发展将根据自然科学与工程的现状和发展趋势有远见地选定超前的研究课题,开拓新领域,以新的概念、理论、技术和方法武装工业,带动其不断前进。

能源是人类赖以生存、发展的物质基础,能源的消耗与利用水平是衡量一个国家国民经济发展和人民生活水平的重要标志,保障能源供应安全是世界各国政府的重要目标。能源的高效开采、洁净和可再生转化利用的许多过程均是典型的多相流及其传递过程,存在着大量的多相流动、传热、传质、化学及生物反应等基础科学问题,如多相流的相分布与相运动规律,离散相颗粒与变形颗粒的动力学,特高参数与复杂几何流道中流动传热的规律和极限、瞬态过程流动传热与临

界及超临界效应,多相连续反应体系复杂过程热力学与微多相流动力学、非均质多相流光化学与热化学等。尽管人们在上述领域已经开展了大量的研究并得出许多有意义的结果,但迄今并没有从根本上掌握多相流及其传递过程的基本规律及其数理描述方法,对上述基础科学问题开展研究非常必要^[3,4]。

6.2 国内外研究现状与发展趋势

国际上多相流学科研究的范围近年来得到较大的拓展和延伸,在多个学科领域均有涉及和交叉,显示出该分支学科正处于蓬勃发展的重要阶段。美国能源部、美国国家自然科学基金委员会联合制定的“2020 反应工程指南”中明确确定多相流体力学研究将作为未来研究的重点。指南规划分为三个阶段:近期研究(0~3年)、中期研究(3~10年)和远期目标(>10年)。为此,美国能源部(DOE)和工业技术部(OIT)联合组建多相流研究联盟,有5所国家实验室和7所高校参加。研究的近期目标是:改进和完善现有多相流计算模型、采用更先进的计算方法研究多相流动过程。在过去的两年中,中国多相流研究取得一系列的进展。

6.2.1 多相流数理模型及数值模拟方法

当前多相流数理模型及数值模拟方法的研究重点仍在两相流。近年来,单相湍流流动中兴起的细观模拟方法,主要是直接数值模拟和大涡模拟,它们逐渐被引入到两相湍流研究中。直接数值模拟和大涡模拟,特别是前者,计算量相当大,虽然不能或难以直接用于工程,但可揭示湍流产生和发展的细节,改进和检验 RANS 模拟^[5~9]。图 6.1 给出了湍流多相流的不同方法及其应用范围。

1. 气(汽)液/液液界面模拟方法

由于气(汽)液/液液流动固有的复杂性,界面的捕获、特别是如何获得精细而锐利的高分辨率一直是多相流数值模拟领域的一个难点,对此的研究和分析也日益受到强烈的关注,当前国际流行的捕获和追踪类方法在国内均有研究小组在进行相关的研究工作(见图 6.2),继续发展高精度 VOF、移动网格 Level set 以及结合 VOF 和 Level set 方法优点的复合方法——VOSET 等^[11]。值得一提的是,目前的研究热点是对于复杂几何条件计算区域的多相流数值模拟,在非结构网格(unstructured mesh)和自适应网格(adaptive mesh refinement, AMR)下采用 VOF 方法、Level Set、IBM 等方法对多相流动进行直接模拟,以及发展无网格粒子法如 SPH、MPS 等,已取得一定的研究进展。

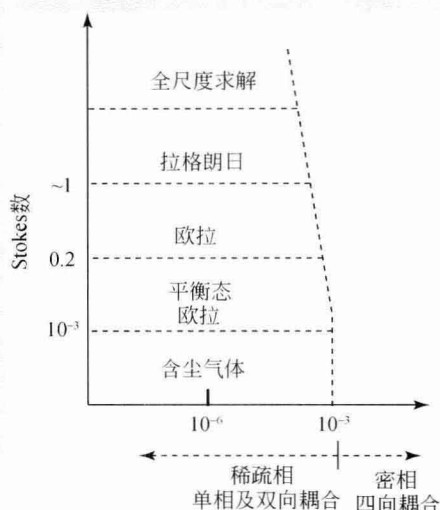


图 6.1 湍流多相流的不同方法及其应用范围^[10]

表面张力的实施是成功进行气（汽）液/液液界面模拟的关键，通常用连续表面力（continuous surface force, CSF）模型^[12]将表面张力表示成体积力的形式。在计算表面张力时，曲率的精确计算非常重要。采用 VOF 方法时，可结合 Level Set 方法或通过海拔函数（height function）法等提高曲率的计算精确度。表面张力也可以通过虚拟流体法（ghost fluid method）^[13]隐式地处理界面动力边界条件。在气（汽）液或液液流动问题的计算中，由于计算的压力梯度和表面张力间的不平衡，会形成虚假流动（spurious currents）^[14]，当密度比很大时，会在界面附近形成波动的压力分布，而且网格加密并不能有效地减小虚假流动和减弱压力的波动分布。力平衡法（balanced-force algorithm）^[15]较好地处理了压力梯度与表面张力间的平衡，相容 SIMPLE 方法或相容投影法^[16]在非交错网格下改善了力平衡法并可有效地减小数值模拟引起的虚假流速并降低大密度比下界面附近的压力波动。

发生相变时，界面处存在质量传递。采用 VOF 等方法处理界面变形时，通常采用 Delhaya 物理模型^[17]处理界面附近的温度分布。界面两侧温度连续分布，但是界面两侧的温度梯度可以不连续。事实上，界面处由于相变引起的质量传递满足 Stefan 条件。在数值模拟时，需要精确计算界面两侧的温度梯度。基于 Level Set 方法发展的亚网格（subcell）模型^[18]可以比较精确地计算界面两侧的温度梯度及由于相变引起的质量传递（见图 6.3）。在多物理场耦合方面，特别是电磁场对流动与传热的影响，也取得较好的研究进展。国内学者发展了相容守恒格式

计算电磁力及相容投影法计算表面张力及压力梯度, 解决了强磁场耦合下流动与传热问题模拟的一个很困难的问题, 对精确模拟磁约束核聚变能量转换部件包层及电磁冶金相关的多相流动和传热有重要意义。

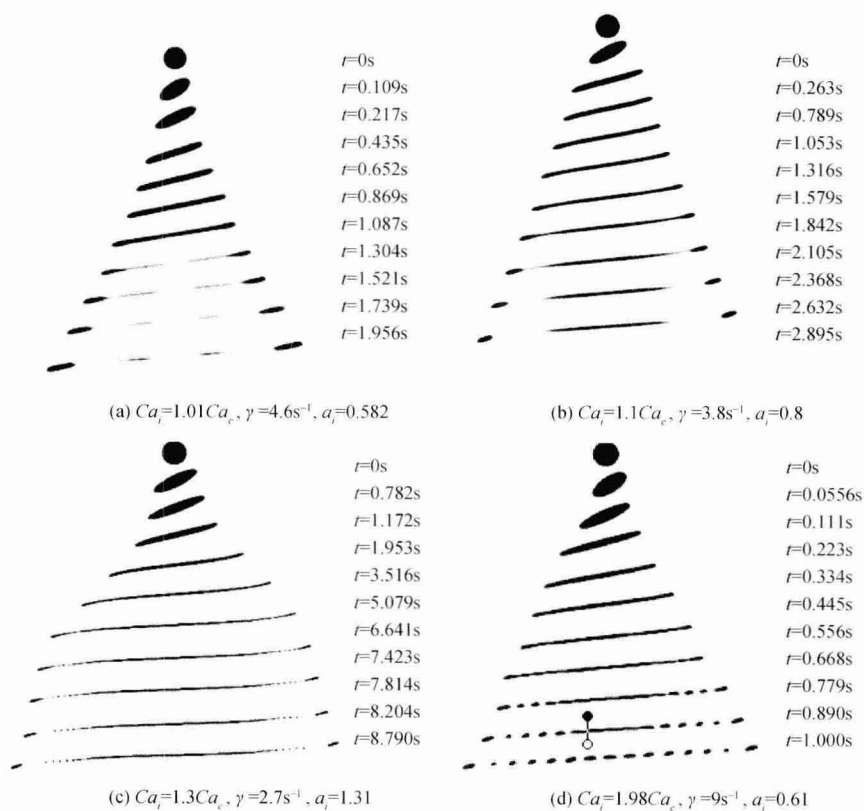


图 6.2 液滴的剪切流场中变形断裂过程模拟 ($\lambda = 0.5$)^[12]

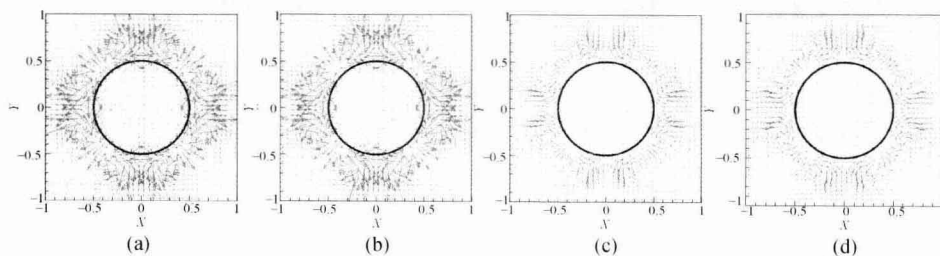


图 6.3 无重力场中圆形液滴不同表面张力实施模型的比较^[17]

2. 气固/液固多相流

气固/液固两相流动可分为稀疏两相流动和稠密两相流动两大类。稀疏两相流动中离散相（颗粒相）的运动受连续相（流体相）的力（阻力、升力等）的控制。连续相的质量远大于离散相的质量，两相之间的作用力在连续相中造成的加速度远小于在离散相中形成的加速度。因此，可以先不计离散相的存在，用流体力学方法求解连续相的湍流流动，然后计算离散相的瞬时速度和位置的运动参数。另外，虽然在稀疏两相流动中离散相也可能发生碰撞，但在离散相发生碰撞时已经完全响应湍流脉动，并且离散相间的碰撞时间极短，大部分时间是响应湍流作用后跟随湍流运动，故许多工程实际计算可以忽略离散相间的碰撞。稠密两相流动中离散相受相间的碰撞控制，瞬时速度和位置由碰撞得出。连续两次碰撞的间隔小于离散相本身完全跟随气流所需的时间，运动行为不能完全地响应湍流脉动，在尚未完全跟随湍流时便已经发生碰撞。因此，必须要考虑颗粒间碰撞，见图 6.4。

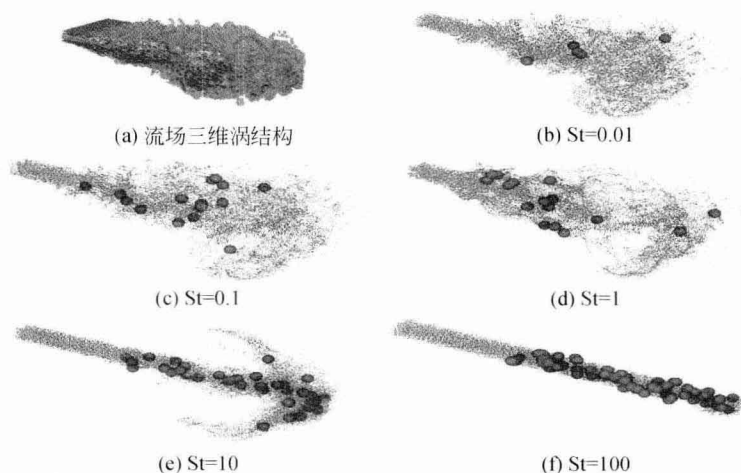


图 6.4 不同 Stokes 数的颗粒在气固两相射流流场中发生碰撞的空间分布^[19]

离散型两相湍流流动的数值模拟总体上有三类，第一类是欧拉-欧拉或称多流体（双流体系）方法，即把连续相（流体相）当做连续介质，把离散相（颗粒相）当做拟流体或拟连续介质，两相在空间共存和相互渗透，都在欧拉坐标系内加以描述。第二类是欧拉-拉格朗日或称颗粒群轨道模型方法，连续相（流体相）当做连续介质，在欧拉坐标系内加以描述，离散相（颗粒相）则当作离散体系，

在拉氏坐标系内加以描述。第三类是拉格朗日-拉格朗日方法,即连续相和离散相均在拉氏坐标系内加以描述。单颗粒动力学模型是早期的颗粒相计算方法,在已知流场的情况下用牛顿第二定律计算单颗粒平均运动轨道,忽略颗粒对气体流场的影响,不考虑颗粒脉动(扩散冻结),这种方法称为单向耦合(one-way coupling)。20世纪80年代后出现了颗粒轨道模型(颗粒拉氏模型)。颗粒轨道模型中把流体相当作连续介质,颗粒相作为离散体系,在拉氏坐标系中考察颗粒运动,考虑两相间的滑移和相互作用。和单颗粒动力学模型不同,颗粒轨道模型考虑流体和颗粒间的质量、动量和能量的相互作用或耦合作用,属双向耦合(two-way coupling)模型。应该指出的是这种“确定轨道模型”,没有考虑颗粒由于湍流脉动引起的扩散(diffusion,也叫“弥散”,dispersion)。近年来提出的“随机轨道模型”(stochastic trajectory model)考虑颗粒的湍流脉动。另外,针对稠密两相流动,在离散模型中引入颗粒之间碰撞即颗粒间相互作用的模型,称为四向耦合(four-way coupling)。

3. 颗粒的受力

颗粒在流体中运动时一般要受到重力、阻力、升力、附加质量力、Basset力等的联合作用。过去的研究者主要靠实验研究或理论推导出计算阻力和升力等各种力的公式或方法,最近有学者经模拟分别得到颗粒周围的流场细节,准确地求出颗粒的受力规律。例如,研究成果发现附加质量力的相对大小和颗粒的材料密度与流体的材料密度之比有关;在当前对升力的认识尚不完善的情况下,计算时需要根据颗粒性质和流动条件选择合理的升力模型。另外,对非稳态流动中的Basset力长时效应机理并没有理解清楚,研究者目前正致力于提高Basset力模型的精度以及寻求更加高效的算法。

对于不可变形的颗粒,在以往的计算模型中均简化为球体,实际上颗粒的形状往往不规则,形状不规则的颗粒在运动中有时会发生旋转,引起Magnus升力,从而改变颗粒的运动轨迹。变质量颗粒、非球形颗粒包括柱形和不规则形颗粒对颗粒的扩散、颗粒-流体的相互作用以及湍流变动也有重要影响。对于不规则形状颗粒的描述,研究者最初使用基于等价直径和形状因子,但针对不可胜数的不规则颗粒形状建立相关阻力关联式的巨大工作量令人生畏。为了考虑作用在颗粒上所有的力得到不规则颗粒的运动规律,可抛弃等价颗粒的概念而代之以颗粒方位模型,考虑流场和颗粒形状坐标之间的转换以及所有重要的作用力和扭矩,这些都有待于今后深入研究。

而对于变形颗粒,其聚合和破裂现象是可变形成颗粒之间以及可变形成颗粒与连续相流体最为主要的作用形式,最终决定两相流中可变形成颗粒的尺寸与分布。可

变形颗粒的聚合和破裂现象与两相流中局部相分布, 界面分布和输运特性, 以及湍流结构的相互影响和相互作用等紧密相关, 对其深层次物理机理本质的认识, 以及相关实验数据的研究积累, 必然会对建立和发展精确可靠的多维两相流数学物理模型起到非常重要的促进作用。总的看来, 可变形和不规则形状颗粒的受力和运动仍有待进一步研究^[20], 见图 6.5。所以, 应该对实验流体中的颗粒运行和形变及其周围的流体进行非接触测量, 以便揭示可变形颗粒的受力机制。

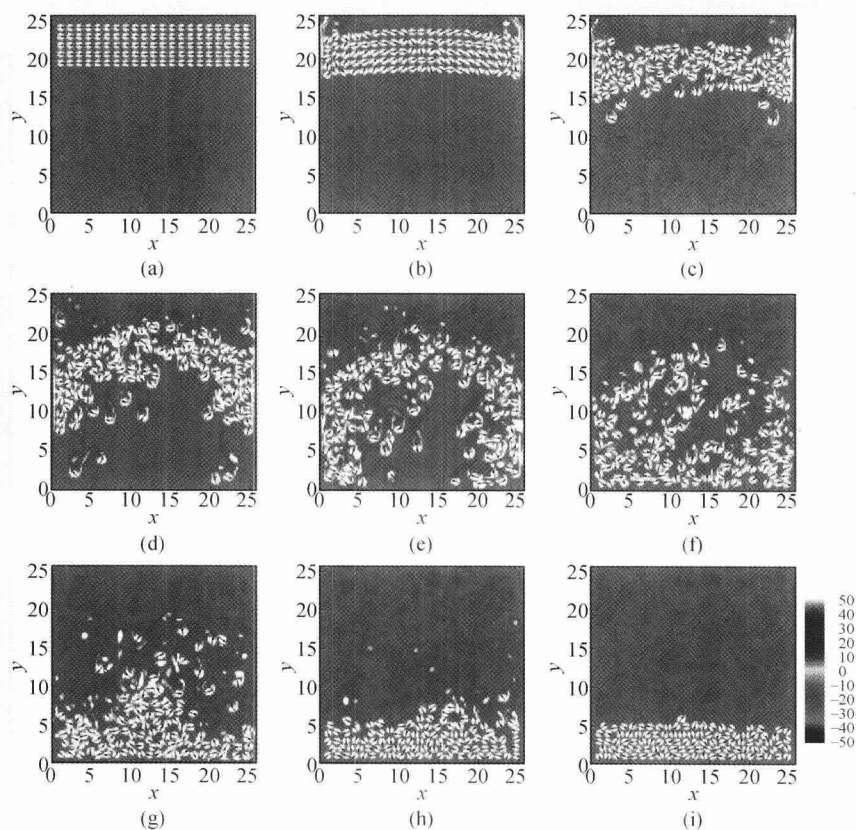


图 6.5 封闭区域内颗粒的沉降过程及流场涡量分布^[21]

目前颗粒受力的模化, 基本上都基于单个刚性球体而言, 但实际的两相流动 (特别是稠密两相流动) 中大量颗粒往往形成颗粒群, 实验表明颗粒群受力与单颗粒受力有很大差别, 各种经验公式差别也较大, 而大量工程科学问题需要用的是颗粒群而不是单颗粒计算式, 因此需要着重用理论与实验的方法对颗粒群的阻

力和团聚特性等进行深入的研究。

4. 颗粒流离散颗粒动力学

气固两相流中颗粒物质是由众多离散颗粒相互作用而形成的具有内在有机联系的复杂系统,工程过程中单个颗粒的典型尺度在 $10^{-6} \sim 10\text{mm}$,颗粒介质在外力或内部应力状况变化时发生流动,表现出流体的性质,从而构成颗粒流。当颗粒浓度高时,颗粒形成的密集流中,颗粒间接触作用会产生较为稳定的力链。这些力链在整个颗粒介质内构力链网络支撑整个颗粒介质的重力和外载荷。当颗粒浓度较低时,颗粒间发生较为频繁的碰撞,相互间传递动量,此时颗粒流内部力或动量的传递方式发生了本质改变。因此,颗粒流分成弹性流(弹性-准静态流和弹性-惯性流)和惯性流(惯性-非碰撞流和惯性-碰撞流)不同的流态。上述颗粒流均呈现在流化床工艺过程中^[22]。

颗粒流的离散动力学方法是能够复现复杂流动现象、提取实验不可能获得的内部流动信息,进而综合起来探索颗粒流问题的一种有效工具,其真实性强于连续介质理论的描述离散颗粒动力学方法。在离散颗粒动力学模型中,尽管颗粒系统的几何特征、物理特性和外界条件的设定远不如连续介质程序那样直接,但是离散颗粒动力学模拟给出一些准则将有助于模型与原型的匹配。应该意识到,由于受现有知识的限制,这样的模拟在连续介质方法中很难实现,如采用离散颗粒方法进行试验,可以获得一些基本认识离散颗粒动力学方法,既可用于参数预测,也可用于在原始资料详细情况下的实际模拟。离散颗粒动力学模拟试验可以代替部分室内试验。在颗粒流动问题中,影响流动介质不规则分布的影响因素很难定量描述,应用离散颗粒动力学可以初步研究影响整个系统的一些参数的特性,对整个系统的特性有所了解后,就可以方便地设计模型,模拟整个过程。因此颗粒流的离散动力学方法已经成为探索颗粒流问题的一种有效工具。根据对颗粒接触作用处理方式的不同,主要分为基于接触力学的离散模型、软球模型和硬球模型。这种模型在计算效率和应用上不尽相同,模型和计算方法也不同,各有其优点。

颗粒流的离散动力学方法逐渐成为探索颗粒流问题的有效工具,但是软球模型和硬球模型存在对颗粒间接触力简化处理的问题,也或多或少偏离了颗粒接触力的真实过程。软球模型存在法向、切向刚度系数如何合理标度等问题,而硬球模型没有考虑颗粒的接触变形,故在今后工程应用中将以软球模型为主。基于颗粒接触力学的离散颗粒动力学模型没有对接触过程做任何简化,适用于准静态流到快速流整个颗粒流态的模拟,特别适合于颗粒流机理的研究,其结果可以用来验证软球模型,必将带来颗粒流研究的突破。

颗粒流的总体特征是系统由大量粒子组成,粒子间作用决定系统的行为。格子玻尔兹曼方法、光滑粒子动力学方法和流体粒子方法是一种接近分子动力学模拟的底层粒子方法,通过物性的对应,模拟宏观的气固两相流动过程,揭示复杂的颗粒流过程。另外,对于非球形颗粒,包括生物质颗粒和废弃可燃物颗粒等的离散颗粒动力学模型,确定颗粒之间碰撞作用机理。分析外场,如电场、磁场、声场和振动等作用下颗粒之间作用规律,综合采用非平衡统计力学、热力学和非线性动力学手段,分析流体微元中结构形成的基本规律,提炼出其中的统计规律以供颗粒动力学的研究。

颗粒动理论是联系细观和宏观的桥梁,颗粒动理论模型是在保持动理论的基本要素如宏观守恒律的基础上来研究颗粒系统的细观行为,如对动理论加以改进以耦合颗粒碰撞非弹性的特点,从而建立起颗粒介质动力学模型。颗粒流动力学中有非常多的前沿课题亟待解决,其中最为突出的是研究颗粒从慢流到快流转变的机理,不同颗粒的混合和偏析以及颗粒内部输运。高浓度气固两相流体相互作用不仅包括颗粒-颗粒和颗粒-流体之间的作用,还涉及聚团-流体、气泡-颗粒和体系-环境之间的各种相互作用。高浓度气固流动结构不仅包括颗粒平衡态结构,也包含过程的耗散结构或非平衡结构等。界面不仅指颗粒和气泡的微观界面,还包括流体-流体、固体-流体、流体-设备之间的宏观接触界面。量化介观结构与行为,构建准确的宏观模型,从而实现气固多尺度结构与界面作用的对接甚至统一是发展趋势^[23]。

5. 非牛顿两相流

自然界中存在着大量非牛顿流体,如油脂、油漆、牛奶、牙膏、动物血液、泥浆等。非牛顿流体力学在化学纤维工业、塑料工业、石油工业、化学工业、轻工业、食品工业等许多部门有广泛的应用,所以对非牛顿流体的研究具有重大意义。近来国内外学者从不同的角度和出发点对非牛顿流体进行了研究,特别是针对非牛顿流体的流变特性、气液两相流流动、传质和传热、流体方程精确解的求解(解的特性)、数值模拟方法可视化研究以及非牛顿流体的应用方面开展了相关研究。

1) 非牛顿流体中的气泡行为

非牛顿流体中的气泡行为在废水处理、石油加工、发酵、聚合物脱挥、有机合成、沸腾、塑料泡沫加工以及环境保护等方面扮演着重要的角色,有关非牛顿流体气泡的生成以及气泡在其内部的运动一直备受学术界的关注。为了设计出高效的设备、必须了解气液两相流的流动规律和流动特性。国内学者为了理解非牛顿流体内部气泡的形成以及运动情况,开展了大量的实验研究工作,建立和开发

了一系列的实验测试技术和测试装置,包括幂律流体分层流和段塞流条件下的气液两相流动规律,可在半透光溶液中清晰成像的气泡激光影像测量系统及不同条件下气泡在聚丙烯酰胺水溶液中的生成行为,非牛顿流体(聚丙烯酰胺溶液)中连续单气泡上升引起的周围液相运动、隐含结构及湍流运动规律,非牛顿流体液滴在空气中的铺展特性等。

2) 非牛顿流体气液两相流数值模拟方法

为了降低实验难度和实验费用,克服实验研究规模小、花费时间长、可测量数据少等缺点,发展行之有效的非牛顿流体数值模拟方法对于深刻理解非牛顿流体的本质现象、辅助工业加工、提高产品的质量以及提高非牛顿流体单元操作的效率非常必要。近年来,国内外学者对非牛顿流体的数值模拟方法开展研究,国外近年来的研究集中在表现出非牛顿流体流变特性的中高浓度颗粒流,国内的研究包括液体黏度对T型微通道内液滴形成的影响,无网格方法对非牛顿流体的数值模拟,非牛顿流体减阻溶液的直接数值模拟,搅拌场下的非牛顿流体数值模拟,非牛顿流体与牛顿流体在旋流器内的流场分布,非牛顿流体的可视化研究,Casson模型对T型血管内血液流动的模拟等。

6. 生命科学中的多相流

多相流在生物流体中有多方面的应用。首先,人体的血液流动本身就是多相流,血液中的各种细胞如白细胞、红细胞等的存在不仅改变了流体的黏性系数,同时也大大影响了流体的流动规律。与传统的多相流有着本质不同的是,在血液中的细胞在不同的剪切应力下发生不同程度的变形,并且还可能发生团聚,反过来影响流动规律,此外血细胞还与血管壁相互作用,这些影响因素同时与健康或疾病的状态相关。在仿真生物学中,如精液中的精子、大海中的浮游生物等的运动的研究等都离不开多相流的分析。目前,在生物医学中,涉及多相流的还包括:在超声粉碎后的碎石等在血液中的流动,用于增强血管成像的超声造影剂、MRI造影剂等流动,以及各种纳米药物等在血液中的流动,人工关节磨损微粒在体内的移动等。随着生物医学技术的发展,多相流在其中的应用将会有更多的发展。

6.2.2 极端条件下的两相流

1. 微通道两相流

近年来,随着全世界航空航天及生物技术的快速发展,微通道两相流从纯基础研究向功能化多相微纳系统的研究过渡,从电子冷却的应用背景向其他高新技术扩展。在航空航天领域,微型无人机存在着对微能源的强烈需求,微小卫星轨

道和姿态控制存在着对相变微推进系统的需求。在生化领域,微通道中液滴或气泡的生成和控制构成各种微反应器的基础。在信息领域,不仅要求对器件进行冷却,还要求对温度进行精确控制,因而提出了数字化微传热的概念。美国自然科学基金会在2008年对微纳米尺度传热的研究作了适当调整,纯基础研究适当减少,面向高新技术相关领域的应用基础研究成为热点,包括人类目前普遍关心的能源与环境领域。例如,采用超快激光与聚合物材料的相互作用制备纳米聚合物材料,用于超级电容器的储能。

在微通道绝热两相流的研究方面,主要针对生化领域微反应器等的应用背景,研究微液滴或气泡的生成和高精度控制原理。微通道两相流大多是层流,可以避免湍流造成的紊乱,液滴或气泡的生成及分布非常有规律,为微通道两相流的控制奠定了基础。已采用微细结构、电场、磁场、光敏剂、热毛细对流等多种方法来生成频率和尺寸均匀的微气泡或液滴。在微米以上尺度,基于宏观尺度连续介质力学的纳维-斯托克斯方程仍基本适用,目前已建立若干微液滴或气泡的生成准则。在数值模拟方面,以界面追踪方法(VOF或Level Set)为核心,对若干流动进行了数值模拟,同时在跨尺度模拟、格子-玻尔兹曼模拟等方面也取得了良好进展。许多因素如通道表面粗糙度、亲水性和疏水性等对流动具有重要影响,两相界面的精确刻画仍存在一定困难。微通道绝热两相流的研究将向复合微液滴的生成和控制以及纳米通道内的两相流(如碳纳米管内的两相流)延伸。在这些场合,实验测量变得更加困难,数值模拟需采用分子动力学等。

微通道内的受热两相流(沸腾和冷凝)远比绝热两相流复杂,主要原因是通道表面汽泡核化或凝结核形成具有不确定性。由于微通道多采用基于硅的微细加工技术,表面粗糙度在纳米级,使微通道沸腾传热的核化起始点温度偏高,进而引起汽泡爆炸现象。已经发现:①光滑微通道沸腾传热取决于无量纲沸腾数,既存在核态沸腾传热机理为主的区域,又存在对流传热机理为主的区域;②光滑微通道沸腾传热系数要小于常规尺度沸腾管传热系数经验公式预测值;③微通道沸腾传热存在强烈的热力学非平衡性,是产生两相流不稳定性的主要原因。由于两相流不稳定性对于微系统运行极为有害,故已对其进行了较多的实验研究,描述了两相流不稳定性的实验现象,研究了在实验段入口加装节流件及在通道表面制备人造核化穴的方法来抑制不稳定性等。在其他应用领域,如对微推进系统中的相变传热、喷墨打印头的脉冲微气泡动力学等也进行了研究。相比之下,微通道相变(沸腾或冷凝)传热的理论和数值模拟工作相对薄弱。

以电子冷却为背景的微通道沸腾传热取得了系列进展,各研究小组已采用多种实验段结构和尺寸,以水、FC-72、丙酮等为工质,进行了宽广范围内的实验研究,基本建立了微通道沸腾传热两相流流型图,获得了传热系数,鉴别了不稳

定性发生的区域及影响因素,研究了采用人造核化穴等微通道沸腾传热强化方法等。微通道沸腾传热的复杂性及各研究者实验条件各异,各研究者之间的实验数据具有分散性,为微通道沸腾传热的定量描述、数值模拟及共性规律的获得带来一定困难。

总之,微通道两相流的发展趋势具有以下特点:从气泡动力学等纯基础研究向高新技术两相流应用基础研究扩展;从微米通道两相流向纳米通道两相流的研究扩展;从简单的显微测量向新的测量技术发展(如荧光测量、红外线测量、与微通道集成一体的传感器测量等);从单纯的实验研究向理论和实验相结合的模式发展。我国近两年来在微通道沸腾传热方面也取得了丰富的成果,主要体现在:

(1) 微通道沸腾传热不稳定性抑制^[24]。针对硅微通道内较易发生压力、流量、温度的大幅度/长周期脉动,研究了微通道入口节流对不稳定性的影响。

(2) 种子气泡传热原理与技术^[24,25]。针对光滑硅微通道沸腾起始点温度高,汽液两相间存在强烈的热力学非平衡性,引起设备启动烧毁及两相流不稳定性等,提出了种子气泡(seed bubble)传热原理与技术(见图6.6)。即在微通道入口制备微加热器阵列,每个微通道对应一个相应的微加热器,在脉冲电压的激励下,周期性产生微气泡,向微通道主受热区流动。微气泡的生成频率可控制汽液两相间的热力学非平衡性(即两相间的温差)。实验表明,该方法可有效触发微通道沸腾起始点,为消除相变传热设备启动烧毁提供了新的原理和方法。实验还发现,低频种子气泡可有效减小各参数的脉动幅度和周期,高频种子气泡可完全抑制两相流不稳定性的发生。

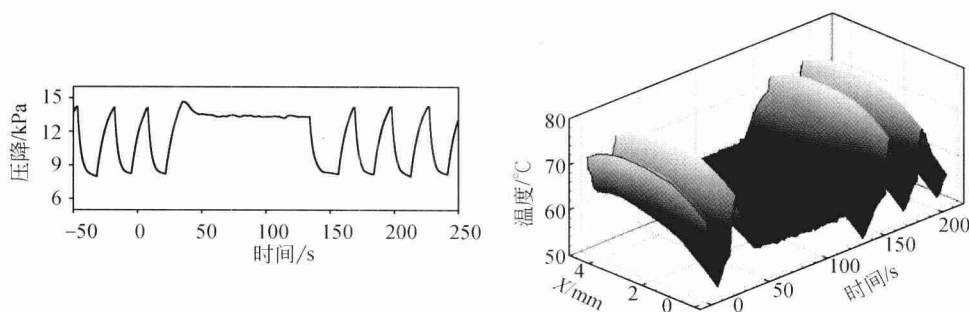


图6.6 种子气泡消除不稳定性、降低温度及改善温度均匀性^[26]

(3) 微弱势差对微通道沸腾传热的影响^[26]。在高干度微通道沸腾两相流中,发现了波状液丝溪状流,波状液丝分布在微通道中心附近,并沿微通道宽度方向

摆动。液丝的中心分布主要是因为微通道宽度方向上温度梯度引起的 Marangoni 效应所致,液丝在宽度方向上的摆动是由汽液界面上的蒸发动量力与 Marangoni 效应的竞争性平衡所致。

(4) 微汽泡喷射沸腾传热^[27]。在高热密度下加热表面产生的聚合汽泡与主流过冷液体接触时破碎成小汽泡,加热表面不易被蒸干,该现象称为微汽泡喷射沸腾传热 (microbubble emission boiling, MEB)。通过在耐热玻璃微通道的壁面上制备微加热器,研究了 MEB 模式的过冷流动沸腾,表明被冷却的热流密度可高达 14.4 MW/m^2 。

(5) 脉冲电压激励的微加热器汽泡动力学行为^[28]。研究了脉冲加热条件下微加热器表面汽泡动力学行为,发现了三类汽泡动力学现象:第一类发生在低热流密度下,特点是汽泡爆炸及再生长;第二类发生在较高热流密度下,特点是汽泡分裂及吸引;第三类发生在高热流密度或高脉冲频率下,特点是前期的汽泡胀缩及后期的大汽泡形成,形成的大汽泡覆盖在加热表面上,可能导致加热表面的烧毁,应该避免。

总体来说,我国在微通道多相流研究方面,在实验器件加工、实验手段、理论和数值模拟方面,与国外存在一定差距;但在微通道沸腾两相流方面,我国已有较多积累,个别成果已达到或接近国际先进水平。

2. 微重力两相流

随着人类航天(特别是大型载人航天)事业的发展,对空间飞行器动力、热与流体管理系统需求的急剧增加,激励了世界各航天大国投入大量的人力、财力和物力开展微重力沸腾传热与两相流动的相关研究,使得微重力沸腾传热和两相流动研究成为当前微重力科学的研究前沿和热点之一。目前,国内外学者大多数主要从事于微重力沸腾传热和两相流动的基础研究,主要针对微重力环境下沸腾传热特性、热毛细对流机理及数值模拟方法,以及微重力环境中气泡动力学特性及生长模型等开展研究。

1) 微重力沸腾传热实验研究

沸腾现象中存在众多影响因素,如成核过程、气泡生长、加热面处固-液-气三相间的相互作用、气-液界面处的蒸发过程以及使蒸气和热液体远离加热界面的输运过程等。上述因素间存在着错综复杂的相互作用,使得沸腾传热过程异常复杂。微重力实验提供了一个将重力因素孤立出来的机会,便于对重力效应进行深入研究。此外,微重力环境可以极大地抑制浮力对流与相滑移现象,凸显加热面附近相变过程在沸腾传热中的作用,有助于揭示沸腾传热的基本机理。近年来,国内学者利用 SJ-8 (育种) 卫星搭载实现了微重力环境,实验研究了平板加

热面 FC-72 液体的准稳态池沸腾传热现象,发现在微重力条件下,传热系数和临界热流密度值 (CHF) 随过冷度或压力增大而增大,同时沸腾起始时的壁面过热度降低,CHF 仅为常重力的 40% 或更低。通过返回式卫星搭载的微重力池沸腾空间实验和落塔短时微重力实验发现,微重力时丝状加热器沸腾传热会略有强化,而平板加热器则在高热流条件下明显恶化。微重力时,气泡脱落前存在沿加热面的横向运动,加剧了相邻气泡间的合并,合并气泡会在其表面振荡作用下从加热面脱落。

2) 微重力热毛细对流机理和数值模拟方法研究

微重力环境中液滴或汽泡的热毛细迁移现象,是由相界面上温度分布的不均匀性引起的界面张力梯度驱动的宏观运动现象,是流体物理基本问题之一。随着空间探索计划的需求,对空间流体管理技术提出了新的挑战。流体管理设备的内角是主要的流体传输“管道”,因此研究微重力下容器内角处的毛细驱动流具有重要而深远的意义。近年来,随着国际空间站的建立和空间微重力流体物理的长足发展,具有工程流体技术应用前景的复杂流体界面现象的流动过程研究引起人们的重视,从而为空间人类生存的环境控制和热机械装置的开发和工程设计提供了理论依据。国内的落塔微重力实验研究发现:微重力下容器内角处的圆角半径对硅油在内角处的毛细爬升速度有显著影响,大普朗特数硅油微重力时间内的热毛细对流 PIV 测量验证了当液层厚度 $h \leq 3\text{mm}$ 时热毛细作用会占主导作用。这些结果可为航天工程中空间流体管理设备的设计优化提供参考,并可以应用于空间微重力科学实验,提高实验液体介质注入和液体界面的控制技术。

3) 微重力气泡动力学特性及模型研究

微重力条件下的气泡动力学特征是微重力沸腾传热的基本现象,是微重力科学和传热学研究的前沿和热点之一。实践 8 号卫星搭载的空间微重力实验研究了微重力条件下的准稳态核态池沸腾现象中的气泡动力学特征及其对传热特性的影响,实验发现微重力条件下的气泡动力学特征与常重力相比有显著差异,并直接影响着沸腾传热特征^[29]。我国第 22 颗返回式卫星进行的空间微重力池沸腾实验汽泡动力学行为特征实验研究了空间微重力池沸腾过程中的汽泡脱落现象,结果显示在重力为变量的条件下,池沸腾临界热流依然可以用 Lienhard-Dhir- Zuber 模型描述,尽管相比于该模型原始的适用范围 $R' \geq 1.5$,无量纲半径范围扩大了 3 ~ 4 个数量级。这和地面常重力环境中关于临界现象尺度效应的研究结果存在极大差异,表明无量纲半径在小 Bond 数情形中,已不再是描述临界热流尺度效应的唯一参数 (见图 6.7)^[30]。微重力条件下小汽泡 (0.3 ~ 1.0mm) 行为与常重力下类似,但是对于中等尺寸 (3.5 ~ 6.5mm) 范围内,汽泡往往黏附在加热

丝上做横向振动,并不断合并所碰到的小气泡,直到超过临界尺寸后脱落(见图6.8)^[31]。

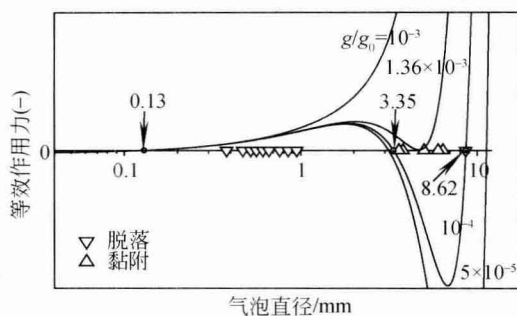


图 6.7 细丝表面微重力核态池内沸腾中的气泡脱落现象^[30]

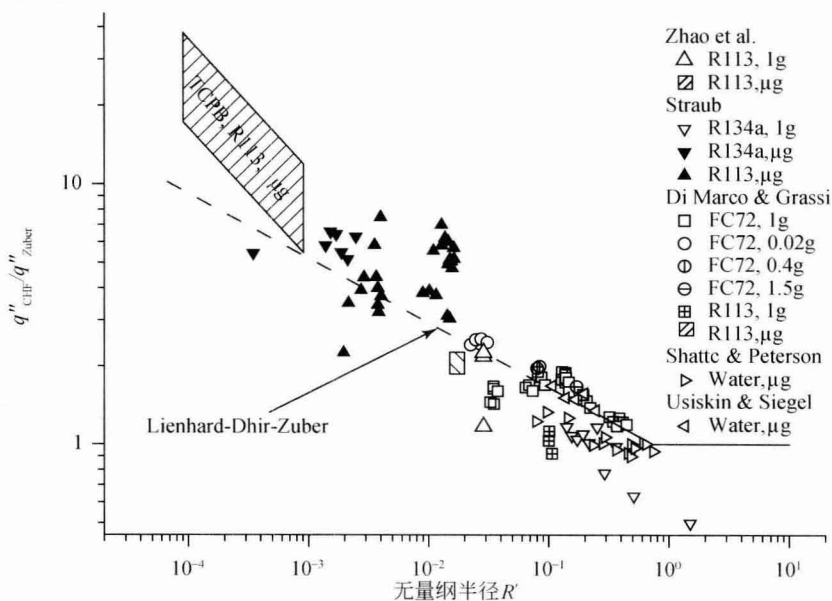


图 6.8 不同重力条件下细丝表面池沸腾中的临界热流^[31]

4) 微重力条件下的气固两相流动研究

在重力条件下,复杂流体的行为特征,如小颗粒胶体在微重力作用下的自组装过程、胶体粒子从无序到有序的转变、微重力条件下颗粒的扩散和聚集等问题

因受自然对流、重力沉降、分层流动等重力作用的影响而被掩盖,因而微重力条件下的气固两相流研究就显得非常重要。近年来,国内外对包括气固两相流体在内的复杂流体的研究非常重视,微重力条件下的复杂流体的研究比例逐年增加,已占有微重力研究的30%以上,在典型界面流动、重力沉降对聚集过程的影响等方面取得重要研究成果。

3. 微尺度爆发沸腾

微尺度爆发沸腾是在瞬态高热流作用下引发的一种超常沸腾现象,它的主要特征在于液体快速加热至高度过热,从而导致急速爆发式的汽泡核化与增长,大量微小汽泡以汽泡群的形态出现,表现出明显异于常规沸腾的汽泡生长变化特征,常见于各类传统的冶金、化工及激光融敷、激光清洗、微电子机械等现代高新技术领域。传递过程中超常现象的出现,使经典理论与常规实验测试技术面临巨大挑战,从而使人们对其微观机理的认识非常有限,对其中的超常现象不能给出合理解释与恰当描述,现有的实验与理论结果不能较好用于指导实践等。

近年来,国内有关学者利用常温液体与低温液氮爆发沸腾实验测试平台,采用先进的实验测试方法与手段分别对爆发式池沸腾与薄液膜相变传热进行了系统深入的实验和理论研究。采用超高速显微放大连续摄影系统拍摄到微秒量级液体工质爆发沸腾过程中汽泡生长变化的动态演变过程,发现异于常规过程的汽泡核化生成与动态规律;采用快速瞬态检测系统分别对爆发沸腾过程中微秒量级温度与压力变化进行了测量,发现并证实了形核温度与加热速率成正比的关系,采用傅里叶变换与小波分析理论对压力变化过程中的能量和频率特性进行了分析。以汽泡群为研究对象,发展了不同于常规沸腾的低温液氮爆发沸腾初始期与爆发沸腾旺盛期汽泡生长变化动力学模型,数值模拟计算与实验结果吻合良好,很好反映了液氮爆发沸腾过程中汽泡生长变化的动态特性。探索发展了强非平衡态条件下爆发沸腾形核三维分子动力学模型,探讨分析了水与液氮爆发沸腾过程中高能分子团簇的均相形核机制与能量转换过程特性及各因素的影响规律,得出水与液氮爆发沸腾形核过程的本质区别与联系;基于刚性水分子 Tip4p 模型与固壁 Harmonic 作用势分子层模型,尝试对采用固壁加热的爆发沸腾形核过程进行了三维分子动力学模拟,采用 Ghost atom 方法对形核体积进行了测定,并对水分子系统的半径分布函数及温度与压力演变过程进行了统计计算,得出不同条件下气泡生长速率、半径分布函数、形核率及温度与压力等的变化规律,从新的角度揭示了强非平衡态条件下超急速爆发沸腾核化机理与动态演变特征,见图 6.9。实验与理论揭示了微尺度爆发沸腾形核机制与汽泡生长变化的动态演变规律、低温液氮爆发沸腾与常温液体爆发沸腾及常规沸腾的本质区别与联系,探讨得出爆发沸腾

在激光清洗、微电子机械系统、激光医疗手术等方面的应用途径。

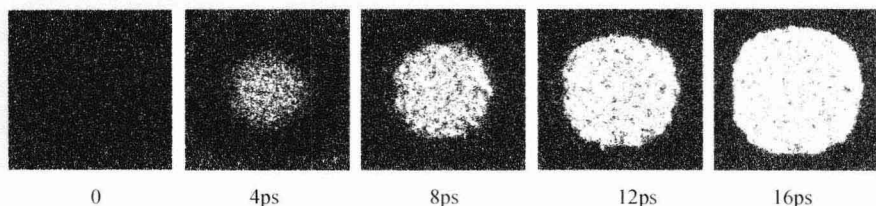


图 6.9 水爆发沸腾形核过程的分子动力学模拟

6.2.3 多相流与传递参数测试方法研究发展趋势

多相流动具有极度的复杂性和多变性,涉及面很广,多年来虽然理论研究有了飞速的发展,但研究手段仍然主要取决于实验,而且最为困难的是缺乏有效测量多相流各种参数的方法和仪器。大部分常规测量手段对复杂的多相流动实验研究显得无能为力。当前多相流学科测试方法和技术研究的发展有以下主要特点:由接触测量向非接触测量发展,形成所谓无干扰测量;由静态测量向动态实时在线测量发展,尤其是高速、脉冲、随机等现象的实时过程测量;由点测量向线测量和场测量发展,使之对现象能有更全面的了解;由单纯依靠硬件的直接测量向硬件与软件相结合的直接与间接测量结合发展,越来越多的依靠数学模型的建立和求解;由单一测量原理向多种物理、化学、生物效应相结合,综合多种测量原理发展;由单一参数测量向多参数综合测量发展;由模拟量测量向数字化测量发展;由测量向测量、诊断、控制、显示等综合系统发展等。

多相流测试研究和应用最多的是采用常规单相流体和传热研究中的测量技术和仪器,结合被测多相流的特点进行改进和修正。随着随机过程理论的深入发展及信号处理技术的不断完善,单相流仪表用于两相流参数检测得到很大发展,但测量本身对多相流动有很大的依赖性,测量理论本身不够完善,多相流本身的复杂性、多变性和不确定性使这样的测量技术有很大的局限性,往往测量精度、稳定性、可靠性不能满足研究的要求,大部分常规测量手段显得无能为力。近年大量跨学科的新技术渗入到多相流测量技术的研究中来,形成多相流测试技术研究的显著交叉学科性质,如激光技术、光纤技术、光谱技术、超声技术、微波技术、光干涉技术等和由这些基本技术延伸和交叉发展的散射技术、激光(X射线)荧光光谱技术、拉曼光谱技术、傅里叶光谱技术、超声成像技术、超声散射技术、静电感应技术、核磁共振技术、辐射线技术、阵列传感技术、新型示踪技术、过程层析成像技术、高速数字成像技术等已大量出现在多相流相流量测量,

流型判断测量, 空隙率测量, 成分测量, 浓度测量, 复杂高温(压)两相流的温度(场)、速度(场)、浓度(场)的测量, 颗粒尺寸及其分布测量等。著名的多相流研究先驱者、英国学者 Hewitt 教授指出, “近代技术渗入多相流测量是对多相流研究的挑战和希望”, 这是对新技术应用于多相流测量很好的写照。多相流测量中新方法新技术的应用以及传统方法和技术的新发展, 引入了大量新的基于物理、化学、生物等基本原理的测量方法和信息数据处理方法, 推动了多变量随机过程、应用数理统计、过程辨识、参数估计和模式识别、小波变换、人工神经网络等所谓软测量理论和技术的发展。

1. 层析成像

为实现快速的空间分布测量, 20 世纪后期工业过程层析成像 (process tomography, PT) 开始出现。与医学 CT 相似, PT 以环绕测量空间的传感器阵列获取信号, 再以反问题的求解重建介质分布图像。在最常用的 PT 成像方法中, 测量区域由许多像素 (pixel) 构成, 而介质分布图像则以像素的灰度值显示。PT 通常为非侵入测量方式, 不干扰流场, 不受介质浓度和光学透视性的制约。经过 20 多年的发展, PT 在测量速度和成像算法等方面有了大幅度进展。国际上有众多的机构开展了 PT 的研究。20 世纪末, 英国曼彻斯特大学杨五强教授首次创建了交流激励方式的电容层析成像系统 (ECT)^[32], 在灵敏度和信噪比方面取得了新进展。2007 年出现了电阻和电容 CT 联合的双模态系统, 而 PT 系统也达到接近每秒 2000 幅图像的速度。PT 因上述优点已在包括多相流和相变过程研究等方面有了应用^[33~36]。

由于 PT 发展历史尚短, 诸多问题尚待解决, 其中最突出的是信息量欠缺与软场问题。在基于像素的 ECT 图像中, 每幅图像常含有成千上万个像素。但因 ECT 电极数较少, 会造成信息量的严重不足以及成像算法中的不适定性。另外, 电场的分布随介质的分布而变形, 造成 ECT 的软场特性, 使其成像较硬场方法 (如 X 射线) 更为困难。这些问题严重影响 ECT 图像的质量, 降低其空间分辨率以及对复杂分布的辨识能力。

因此, 在信号获取方面, 多机理传感器的融合成为丰富信号体量和提高信号质量的前沿技术和发展方向。目前可见的 ECT + X 射线的双模态系统结合了软场与硬场的功能, 然而这两个模态在测量的精度和速度的协调方面尚有较大的发展余地; 电阻 + 电容的双模态系统对于介质的导电系数处于较高或较低的范围均有较高的覆盖, 但在某些中间区域则两个模态均难以兼顾, 这为今后的研究提出了新的课题。

在图像重建领域, 近来强调的非线性图像重构方法, 在一定程度上加深了机

理的研究深度,然而重建图像的质量却未能见到显著优于线性方法的特色。因此,在今后的研究中,应全面挖掘包括线性方法在内的多种成像方法的潜力。为攻克过程层析成像信息量缺乏的难题,多机理测量信息的融合成为关键的方法。多机理融合的成像方法,不仅在于多个机理所成图像之间的融合,更重要的是在形成图像之前的信息融合。

在过程层析成像感应机理方面,当前的研究突破了传统的单一感应机理的束缚。例如,电容层析成像不仅仅是探测由于两相介质分布造成的介电常数的分布,而且在对多孔介质中火焰的检测中证明了它对多种机理作用的感应能力^[37]。这种对感应机理本质的探讨,有助于形成多种参数的同时测量方法,成为值得重点关注的方向。

目前,PT成像与基于热物理原理的参数描述方法相结合,二者相辅相成,成为一种新的多相流检测趋势。对于PT物质分布与运动速度的同时检测,近来有如ECT+速度相关法结合同时获得物质分布与物质流量的测量方法。尤其是在计算机技术取得大幅度发展的前景下,三维速度相关方法已得到了初步的研究。PT的近期发展方向,除了强调其早日实现大规模工业应用之外,在检测的机理方面提出了太赫兹(THz)的燃烧/温度检测方法,以及燃烧产物空间分布的实时测量的方法。这些新的领域在国际上受到广泛关注。

2. 核磁共振成像技术

核磁共振是物质原子核磁矩在外磁场的作用下能级发成分裂,并在外加射频磁场的能量条件下产生的能级跃迁的核物理现象。核磁共振是基于原子尺度的量子磁物理性质,其测量方法是,将样品置于外加强大的磁场,样品核自旋本身的磁场,在外加磁场下重新排列,大多数核自旋会处于低能态,额外施加电磁场来干涉低能态的核自旋转向高能态,再回到平衡态释放出射频,产生核磁共振信号。核磁共振成像(MRI)是核磁共振在科学研究和临床医学上的应用,MRI改变的外加磁场强度可以在垂直于主磁场方向提供两个相互垂直的梯度磁场,磁场每一个位置都会有一个强度不同、方向不同的磁场,这样样品不同部位就会对不同的射频信号产生反应,通过记录与计算处理,可以得到样品内部结构图像。核磁共振成像对于分子环境及动力学过程具有高灵敏度,能够提供准确和定量的数据^[38,39]。

目前,MRI技术已成为科学研究的重要手段。从核磁共振现象发现到MRI技术成熟这几十年期间,有关核磁共振的研究曾在三个领域(物理、化学、生理学或医学)内获得了6次诺贝尔奖,这足以说明核磁共振及其衍生技术的重要

性。MRI 技术以其具有的无损、多维、多核 (H^1 、 F^{19} 、 Na^{23} 等)、多参量 (自旋密度、弛豫时间、渗流速度、化学位移等) 等优点, 不仅在医学领域取得重大成功, 而且在涉及多孔介质检测研究方面也做出重大贡献, 特别是在岩心分析中对其骨架结构及内部多相渗流与相分布等方面研究带来重大变革, 具有其他方法无法比拟的优点, 对研究 CO_2 地质封存、提高石油采收率、地下油/水/污染物运移等具有重要意义。

多孔介质孔隙结构、局部流动速度和多相分布的变化是导致多孔介质内的流体流动十分复杂的主要因素, 其中流动速度是最能体现流体渗流运动状态传输过程的参数之一, 因此一直以来许多研究者都利用不断提高的 MRI 技术对多相流动速度进行了深入研究。

常规测量流体流动速度方法主要有时间飞跃法和相位位移法两种。近年来, 随着一些快速成像方法被提出, 如回波平面成像法 (echo-planar imaging, EPI)、快速小角度激发法 (fast low angle shot, FLASH)、弛豫增强快速采集 (rapid acquisition with relaxation enhancement, RARE) 等, 一些研究者将快速成像方法与速度相位编码组合用来进行多相流动速度成像研究, 并取得了一定的成果, MRI 技术正在逐步应用到各个关键科学研究领域。

3. 超声高浓度液固两相流在线测量

声波极强的透射能力使超声测量方法在无须稀释、快速、可靠的高浓度液固两相流在线测量技术中得到了越来越多的重视, 国际上近年来发表的与之有关的论文数量大大增加。

声波是机械波, 与光波不同, 它在颗粒两相流中传播时的衰减以及速度与连续相和离散相 (颗粒) 的许多物理特性有关 (如需分别知道颗粒相和连续相的比热、导热、黏度、声速和声衰减等), 造成不同频率的超声波在相同浓度和颗粒粒径的两相流中的衰减以及传播速度不同, 其衰减谱或速度谱中包含了有用的颗粒系粒径分布信息, 通过测量不同频率声强度的衰减谱或速度谱, 可以得到颗粒的粒径和浓度。

在颗粒相体积浓度不同时, 声波与颗粒相以及颗粒相间的相互作用机理是不同的。体积浓度大于 $5\% \sim 10\%$ 时, 颗粒间相互作用 (particle-particle interaction) 机理对声衰减和速度逐渐起主导地位, 因此在采用声衰减谱测量浓度高于 10% 的超高浓度两相流时, 必须研究该机制的影响。研究超声测量颗粒两相流的另一方面是研究声速在颗粒两相流中的传播规律来测量颗粒的浓度和尺寸。尽管有学者认为声速对颗粒粒度变化的反应不如声衰减敏感, 但理论研究表明, 声速对颗粒浓度和粒度变化的敏感程度和声波波长与颗粒粒径的比值有关。在通常采用较

低频率超声波（数百 kHz 到数 MHz）进行测量的情况下，声波的波长远大于被测颗粒的粒径，因而声速与颗粒粒径及浓度变化的关系较小。但在超高频率的情况下，声速对颗粒粒度和浓度变化比较敏感。同时，声速受传播介质中物性参数影响较小，相对于声衰减测量需要事先知道的物理参数较少，更宜于实现在线测量。

与声衰减和声速类似，声阻抗也是表征媒质固有特性的一个基本物理量，它决定了声波在不同界面上的反射行为。研究表明采用声阻抗谱法测量高浓度液固两相流，不仅类似具有声衰减谱和声速度谱法的非接触在线测量的特点，而且可以最大限度地融合各种超声特征量，适当加以拓展，可同时测量高浓度液固两相流中颗粒粒度分布、浓度、密度以及黏度参数，可以为超声法测量颗粒两相流提供新的测量方法。

超声测量方法不仅可以测量高浓度液固两相流，还有可能测量流体中的组分浓度。流体中的不同组分对声的衰减和传播的能力是不同的，即可能具有“声指纹”信息。掌握这些“声指纹”信息，就可以对该流体的组分进行快速测量，如在牛奶中添加三聚氰胺事件暴露后，在对牛奶和乳剂超声特性研究的基础上，提出了根据鲜奶液中脂肪滴尺寸分布和蛋白质胶体尺寸分布的超声指纹特性来进行鲜奶液品质快速检测的设想，进行了多种牛奶声学特性研究，包括在牛奶中掺水或掺尿素等对声速和声衰减的影响等，得到了很好的结果。

4. 气固两相流动在线测量

1) 静电法测量

气固两相流中由于颗粒之间以及颗粒与管壁之间的碰撞与分离会导致颗粒荷电、粉体颗粒荷电载有大量的动态信息，是流动特性、输送形态、输送管道几何特性和粉体颗粒特性（颗粒的形状、尺寸、粗糙度，相对湿度、功函数等）等因素内在作用的综合体现。这些信息从不同的时间和空间反映了气固流动特性，因此结合适当的信息处理手段，有可能建立气固流动结构表征的新方法。近些年来发展起来的被动式静电传感器/静电层析成像（electrostatic tomography, EST）技术无需激励源，具有结构简单、非接触、灵敏度高、价格低廉、适合恶劣的工业现场环境等特点，在气固两相流检测与控制中引起了人们的极大关注。静电法测量气固两相流的研究主要集中在两方面，即高灵敏度静电传感监测系统的研究和静电层析成像反演算法的研究。

2) 光脉动谱法测量

当一束光入射到稀相气固两相流中（如电厂的煤粉输送等），受粉体颗粒的散射和吸收，其透射光强会衰减。在测量光束直径及测量区很小时，流过测量区

的粉体颗粒的数目和大小是随时间随机变化的,透射光强也就随时间发生脉动,该随机脉动信号与在测量瞬间处于测量区中的粉体颗粒大小和数目有关。测出透射光信号的随机变化信号,就可应用光脉动谱法理论进行分析,得到气固两相流中颗粒相的平均粒径、粒径分布和浓度,进一步结合互相关法,还可以得到颗粒的运动速度等参数。

5. 特大喷雾测量

特大喷雾是指单个喷嘴流量每小时数十吨以上至数百吨以及雾滴最大粒度达数千微米的喷雾。这类喷雾在许多工业领域得到应用,如大型电厂的湿法脱硫塔内喷雾等。因为特大喷雾具有过大的流量和雾滴粒度,所以对这类喷雾的测量及机理研究极其困难。

透过率脉动法和透过率起伏频谱法是最近发展起来的颗粒两相流测试新方法,采用一束直径小于被测颗粒粒径的窄光束照射被测颗粒两相流,颗粒的散射和吸收作用导致透射光信号衰减并随机脉动。这种信号的脉动与两相流中颗粒的粒径与浓度密切相关。透过率脉动法和透过率起伏频谱法提取透射光脉动信号的频谱特征,通过滤波处理和相关处理来获得颗粒的粒径分布、浓度和两相流的流速信息。

由于该方法具有针对大颗粒测量的有效机理和对高浓度效应修正的功能,特别适合对特大喷雾的测量,可测雾滴粒径分布覆盖了 $100 \sim 8000 \mu\text{m}$ 的区间。基于该方法的特大水滴粒度分布测试系统目前已成功应用于大流量雾化喷嘴试验平台测量特大喷雾的空间结构和流动参数、雾滴粒径分布等。

6. 纳米流体及微通道内两相流测量

纳米流体因其在提高流体导热系数、减小壁面摩擦阻力、改进光学性能等多方面的独特性能以及在很多方面(能源方面如石油开采、生物医学方面等)具有良好的应用前景而引起了学术界和工程界的广泛关注。在纳米流体中,除了纳米颗粒和分散介质材质本身的导热性能外,影响纳米流体传热特性的参数主要是纳米颗粒的粒度、团聚、浓度(体积分数)、流体中的空间分布、纳米颗粒的运动状态。研究还发现,纳米流体界面层内颗粒的运动、浓度和粒度对换热效率有很大影响,这种影响对微型换热器(微通道换热器)尤其明显。

迄今为止,对纳米流体内部和边界层内纳米颗粒的运动特征、纳米颗粒的粒度与团聚情况、纳米颗粒的浓度分布这些参数还缺乏足够的实验与理论研究。其主要原因是缺乏获取这些数据的测量方法和探测手段。现有的纳米流体两相流理论基本上是基于颗粒是圆形的这一假设,但近年出现的石墨烯和石墨碳管分别是

二维和一维纳米颗粒,球形假设的理论已不能再准确描述二维和一维纳米流体的两相流动。而二维和一维纳米流体两相流理论的建立和完善,也依赖于对其流动等参数的准确测量。因此,纳米流体(包括纳米流体内部和纳米流体边界层)中纳米颗粒的运动特征、粒度和浓度分布信息的测量显得非常重要和紧迫。

就目前研究的现状而言,超声谱法和动态光散射法是最有希望实现这一目标的测试方法。自20世纪90年代中期以来,激光自混频方法作为动态光散射法的一种新技术得到重视,并与激光全反射技术相结合,适合对纳米流体内部和边界层进行测量,该方法的发展尤其对微通道纳米流体的测量具有极大的应用前景。

7. 图像法两相流在线测量

图像法早在几十年前就已成为两相流动测量的一种有效方法,高速摄影曾在许多动态过程和瞬态过程的研究中发挥了重要作用。因受后续图像处理工作量很大以及缺少有效快速的图像处理方法等缺点的限制,在激光测量等方法兴起后逐渐衰败,到20世纪90年代基本不再使用。自2000年以来数码技术、计算机技术、激光技术、光学技术以及图像处理算法等的迅速发展,使得图像法测量重新获得了新生,又迅速兴起,以全新的面貌正在成为两相流测量的重要方法。尤其是图像法具有“眼见为实”的特点,在两相流测量中可以获得比其他测量方法更多的信息,将会极大拓展在生物、医学等领域中微观两相流的研究。

图像法测量的研究包括数字高速摄像、数字激光全息、多相机合成三维图像测量、单相机多图像三维测量、显微三维图像测量等。图6.10、图6.11给出了单幅图像法两相流场测量的结果。与常用的PIV不同,在这种方法中并不是采用极短曝光时间“冻结”运动颗粒来得到流场参数,而是采用较长的曝光时间,将得到的颗粒运动轨迹进行适当的数学处理来获得流场和颗粒的粒度分布以及浓度场。

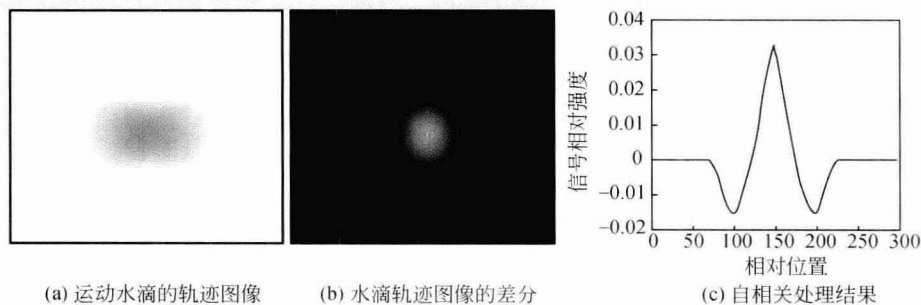


图 6.10 单幅图像法两相流场测量的结果

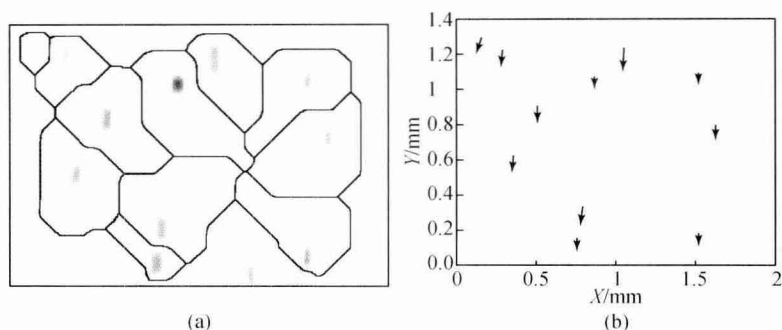


图 6.11 喷雾水滴流场图像和二维速度场

无论怎么说,多相流测量技术仍然是非常不成熟,新技术也还较少能获得非常满意的研究成果和工程应用。问题的关键是如何从这些涉及物理、化学和数学等基本效应并将它们应用到测量多相流各种参量的研究中提炼出一些基本科学问题,进行深入的研究,结合复杂的实际情况,探索新的测试方法。早年的激光多普勒测速(LDA)技术发展到相位多普勒技术(PDA)不仅能测量速度,还能得到两相流中颗粒粒度及其分布的参数;从光学流型显示发展到颗粒图像测速仪(PIV或PTV),测量二维速度场分布;近年结合激光荧光技术发展的平面激光荧光技术(PLIV)可以同时测量二维温度和浓度场分布。这些都是学者们深入研究相应基础科学问题的结果,不仅为一些复杂的两相流研究提供了可靠的测量数据,而且推动了多相流测试理论和技术的发展。上述新技术应用于多相流测量还有一个显著特点,就是某种物理(或化学)效应可以测量几个多相流参数;而某种参量又可以用几种不同的测量方法得到,如速度参数可以用LDA技术测量,也可应用超声、光学、静电等技术测量;而有关流型参数、温度参数测量的方法更多。多相流测量中另一个需要着重指出的是,必须注重研究测量过程中技术问题的解决。

6.2.4 我国多相流学科的重要研究进展

我国多相流科学研究的一个重要特点就是结合我国工业发展的具体需求特点,围绕多相流及其热、质传输和物理、化学、生物反应等的基础理论和规律这一核心,深入研究解决现实中制约我国国民经济发展的科学与关键技术基础问题。最近的重要研究进展具体包括:

1) 油气集输的节能减排和安全高效关键工艺及装备(2009年度国家发明二等奖)

我国油气田生产还处于高能耗、高排放、低效率阶段,油气集输的成本占油田生产总成本的30%以上。因此,如何简化油气集输工艺流程、提高其节能减排和安全性是新油气田建设和老油气田二次开发的重大挑战。由于我国油气藏的特殊性和开发模式的自有特点,不能照搬国外先进工艺技术,亟待自主解决能满足低能耗、低排放、高效率、高安全与可靠性的油气集输的关键工艺及装备。本项目历时10余年,开展了油气集输关键工艺所涉及的理论和技术研究,发明了油气集输的流动在线测量与控制、除砂与除湿相分离、高效加热等关键工艺和装备,实现了油气集输的高效、安全和节能减排。针对该领域国内外均缺乏有效的实验研究设备和方法等问题,自主设计搭建了专门用于油气集输关键工艺与装备研发与验证的实验装置;发明了油气集输工艺中的油气水多相流流型在线识别仪和相含率在线测量仪,准确率分别高达90%和95%;发明了油气集输工艺中严重段塞流控制与消除方法,从根本上消除了严重段塞流,实现了最优节流;发明了油气集输工艺中的螺旋管流除砂器和天然气超音速旋流除湿器,除砂率大于85%;发明了油气集输工艺中的新型油气混输相变加热炉,使加热效率提高了20%~30%,排污减少30%。以上关键技术发明,解决了直接造成油气集输过程高能耗、高排放和低效率的油气水流动在线监测与控制、油气净化和分离、高效加热等关键技术难题,开发了先进的流型在线识别仪和相含率在线测量仪、螺旋管流除砂器和天然气超音速旋流除湿器,以及3大类2个系列40多个品种规格的油气混输相变加热炉等油气高效集输工艺中所必需的仪器、装置和关键装备,满足了油气集输工艺过程中的低能耗、低排放、高效率、高安全与可靠性要求,实现了油气集输的高效、安全和节能减排,并简化了油气集输的工艺流程。

2) 水煤浆代油洁净燃烧技术及产业化应用(2009年度国家科技进步二等奖)

水煤浆是一种高效清洁的新型煤基流体代油燃料,由60%~70%煤粉、30%~40%水以及小于1%化学添加剂制备而成,水煤浆质量标准如下:浓度,65%~70%;黏度,约1000CP;粒度, $d < 50\mu\text{m}$;灰分, $A < 7\%$;硫分, $S < 0.5\%$ 。水煤浆能像油一样地贮存、输送和雾化燃烧,燃烧效率高,而灰分、 SO_x 和 NO_x 等污染排放低,在相同热值下燃料价格仅为重油的1/2左右,故以水煤浆代替燃油具有显著的经济、社会和环保效益。发展水煤浆技术,以煤代油,是我国能源长期稳定发展的战略和现实选择。经过20多年的研究开发和工业应用,本项目研制成功具有完全自主知识产权的水煤浆代油洁净燃烧技术以及配套关键设备工艺,开发成功系列适于电站锅炉、工业锅炉和工业窑炉的大中小型水煤浆锅炉和配套关键技术。经过20多年基础研究和技术开发攻克了一系列关键技术

难题：高黏度液固两相流的高效雾化难题、水煤浆喷嘴的防堵防磨难题、水煤浆含水分高的着火难题、水煤浆燃烧温度低的炉膛稳燃难题、水煤浆不易燃尽的燃烧效率难题、水煤浆锅炉变负荷难的优化调整难题等，取得了一系列具有完全自主知识产权的关键创新技术成果。

(1) 首创了多项水煤浆锅炉的燃烧关键技术，解决了高水分浆体燃料的强化传热和高效燃尽难题，并已在 670t/h 以下多种锅炉和窑炉上获得成功应用。其中 670t/h 全烧水煤浆的新设计专用锅炉为目前国际上最大的能长期连续运行水煤浆锅炉，水煤浆燃烧效率大于 99%，锅炉效率大于 90%~91%，负荷调节范围达到 40%~100%。

(2) 独创了撞击式多级雾化水煤浆喷嘴，解决了高黏度非牛顿液固两相流的高效雾化难题。在结构设计上将 Y 型雾化、T 型雾化和撞击雾化有机结合，雾化性能好，汽耗率低，喷嘴最大容量达到 6~8t/h，使用寿命长达 1500h 以上。开发了水煤浆在线过滤器，最大容量达到 30~40t/h，有效防止了雾化喷嘴堵塞问题。

(3) 成功开发了多种浆液燃料低 NO_x 燃烧器，包括四角直流、六角直流、旋流、侧边风等多种型式，实现了强化着火、稳定燃烧和促进燃尽的性能，可适用于水煤浆、水焦浆、重油、煤焦油等多种燃料。

(4) 成功开发了水煤浆再燃脱硝技术，炉内脱硝率达到 30%~50%，使烟气中 NO_x 排放浓度达到 $450\text{mg}/(\text{N} \cdot \text{m}^3)$ 以下，并且国际上首次在 670t/h 水煤浆锅炉上获得成功应用，锅炉烟气环保指标符合国家排放标准，实现了高效低成本控制 NO_x 排放。

(5) 成功开发了在线过滤器等水煤浆卸、储、运、供等设备和系统，过滤器最大容量达到 30~40t/h（达到国际上最大水平），流阻损失小于 0.1MPa，实现功能是过滤掉水煤浆中的大颗煤粒及杂质，以防止雾化喷嘴堵塞，同时对水煤浆在线过滤器进行系列化设计，保证了锅炉能够长期安全稳定连续运行。

(6) 提出了一整套关于水煤浆燃烧、流动、传热和气化的创新基础理论，建立完整的理论数学模型及数值计算体系，撰写了国际上唯一全面论述水煤浆燃烧理论和技术的专著（岑可法等，《煤浆燃烧、流动、传热和气化的理论与应用技术》，浙江大学出版社，1997）。

(7) 利用该技术设计新建或改造的水煤浆锅炉已接近 500 台，其中 670t/h 全烧水煤浆的新设计专用锅炉（200MW）为目前国际上最大的能长期连续运行的水煤浆锅炉，每年可以为国家节约替代燃油约 150 万 t，取得了重大的经济、社会和环保效益。

3) 新能源转化中的多相流

通过热化学、光化学及光生物的方法将太阳能直接转化为氢能或其他能源产品,给人类提供了高效低成本解决增加能源供应、保障能源安全、保护生态环境、促进经济和社会可持续发展的理想途径。近年来,有关研究小组以高效低成本的直接太阳能光、热化学及生物转化与利用为目标针对能源高效和可再生转化过程中的微多相流光化学与热化学反应理论持续展开研究,对高效光解水制氢催化剂及光催化体系做了持续深入的研究和探索^[40]。

在太阳能光催化分解水制氢研究方面,开发了一系列高活性光催化剂及光催化体系,自主研制成功光催化剂快速合成与筛选系统,建成了国际上第一套直接太阳能光解水制氢装置。光催化剂的产氢量子效率、能量转化效率与稳定性等指标均达到国际先进乃至领先水平,在光催化反应机理表征等方面也取得重要进展,受到国际同行广泛关注^[41]。2011年开发的孪晶硫锌镉固溶体光催化剂在无贵金属助催化剂负载的情况下,420nm处量子效率可达40%以上,这是同期国际上公开发表的文献所报道的最高水平,且在太阳光直接照射下光能转换效率达6%以上^[42],率先在国际上实现了连续反应流直接太阳能光照条件下的光催化分解水连续制氢,为太阳能光解水制氢的规模化利用打下了坚实的基础。

在太阳能热化学分解水和生物质制氢研究方面,在国际上首次提出利用聚焦太阳能驱动热化学分解水和生物质制氢的新思路,研制成功两类聚焦太阳能与生物质超临界水气化耦合的制氢系统;解决了高浓度生物质的高压多相连续输送等一系列难题,实现了生物质模型化合物与多种原生生物质的完全气化,获得了最佳反应工艺条件及其操作参数对气化结果的影响规律,初步揭示了气化制氢机理^[43~45]。

由太阳能热化学分解水和生物质产生的富氢气体可以直接作为氢内燃机、微型燃气轮机或高温燃料电池的燃料使用,也可通过进一步加工生产高纯氢气或合成液体燃料。国内已在天然气掺氢发动机的燃烧规律等方面开展了卓有成效的研究工作,为天然气掺氢发动机优化设计提供了理论依据和实施方案。太阳能光催化与光生物分解水制取的氢气纯度较高,可直接供PEMFC等中低温燃料电池使用,中国学者所构建的光生物制氢反应器与碱性石棉膜燃料电池耦联的示范系统,成功展示了利用海洋绿藻光解水制氢直接供燃料电池发电的可行性。

经过十余年的努力,我国在利用太阳能制氢领域的研究工作取得了长足的进展以及众多实质性的成果,并成功迈入国际舞台,走到该领域国际学术的前沿,为进一步开展更高水平的研究工作打下了良好的基础。

4) 多相流测试技术

我国基金委等科研管理机构非常重视原创性的多相流测量技术,通过设立专题项目的方式鼓励这方面的研究工作。近年来国内相关测量技术研究和应用的论

文比例越来越高,先进的 PIV 等测量技术已经得到广泛应用。我国多相流测量技术的发展体现出很强的工业应用背景,在过程层析成像、流型在线识别、多相流界面参数测量等方面发展出多种原创性的测量技术和仪器设备,如网丝电容法高速两相流层析成像,非闭合电极电容层析成像,基于压力压差信号多传感器多信号信息融合技术的流型在线识别,多重单丝电容探针组/多重双平行电导探针组测量气水两相流相界面结构,汽轮机内湿蒸汽两相流测量,单幅图像法测量两相流流场和粒度分布,超声衰减谱、速度谱和阻抗谱在线实时测量高浓度两相流和纳米流体,静电方法测量气固两相流,光透过率脉动法测量气固两相流,透过率起伏频谱法测量特大喷雾,电容法火焰层析成像等。重要的进展有:

(1) 气固两相流动在线测量。

静电法测量方面,利用大型有限元分析软件 Ansys 研究了影响静电传感器灵敏度的主要因素,深入系统地仿真研究静电传感器敏感元件的几何形状、绝缘材料特性、电磁屏蔽罩的几何形状以及固相介质的分布对静电传感器特性的影响,提出了一种基于静电传感器空间滤波效应的颗粒平均速度检测方法,该方法利用单个圆环静电传感器实现了颗粒平均速度测量,降低了测量设备及信号处理的复杂性,减小了对流动条件的依赖性。重力输送颗粒试验结果表明:颗粒浓度在 0.5%~6%,速度在 2~6m/s 时,测量误差小于 $\pm 4\%$ 。加压密相气力输送煤粉试验结果表明:颗粒浓度在 6.72%~13.04%,表观速度在 8.63~18.6m/s 时,测量重复性在 $\pm 5\%$ 以内。光脉动法测量方面,已成功地研制出国际上首套直接在线测量电厂煤粉粒度及分布、浓度和速度的气固两相流测量仪器。

(2) 湿蒸汽两相流测量。

汽轮机内湿蒸汽两相流中的水滴依其产生机理不同可分成两类:一类是自发或有核凝结生成的 1 次水滴,这类水滴的直径比较小,一般不超过 1~2 μm ,其单位体积的数目非常巨大,可达 $10^6 \sim 10^8$ 颗/ cm^3 ,运动速度很高;另一类是由部分 1 次水滴沉积在静叶栅和动叶栅上形成的水膜在气流作用下破碎而形成的 2 次水滴,这部分水滴的直径较大,可达几十微米到数百微米,其速度大小和方向因与直径有关,变化很大。因其形成机理和流动的复杂性,汽轮机内湿蒸汽是一典型的复杂汽液两相流。经过多年的研究,发展了基于光散射法、光脉动法和气动探头集成的湿蒸汽测量方法和仪器,在国际上首先实现了湿蒸汽 1 次水滴、2 次水滴和流场多参数的同时在线测量,并在国际上首次证实汽轮机内湿蒸汽流的凝结过程存在有核凝结和自发凝结两种机理,有核凝结先于自发凝结发生,但最终自发凝结处于主导凝结过程。目前该测量方法已在国际上得到采用。

5) 生态环境保护与高新技术领域多相流

近年来,国内多相流学界在自然资源开发与环境保护、高新技术等新兴、交

叉学科领域开展了卓有成效的研究与探索,形成了注重基础、涵盖面广、交叉性强的学术研究新方向,在沙尘暴起动的力学机制、微电子器件冷却(射流冲击沸腾传热强化机理)、燃料电池、材料制备与加工中的多相流热物理、生物医学工程中的多相流与传热形成了自己的特色。

6.2.5 论文发表情况分析

International Journal of Multiphase Flow 是多相流研究领域最专业的权威学术期刊,随着多相流研究的蓬勃发展,它的影响因子已从1999年的0.870上升到2009年的1.514。其他刊登多相流方面文章的期刊包括化工类著名期刊 *AICHE Journal*、*Chemical Engineering Journal*、*Chemical Engineering Science*、*Powder Technology*、*Chemical Engineering & Technology*, 物理类期刊 *Physics of Fluids*, 传热传质流动类期刊 *International Journal of Heat and Mass Transfer*、*International Journal of Heat and Fluid Flow*、*Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*、*Experimental Thermal and Fluid Science*、*Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME*、*Experimental Heat Transfer*、*Heat and Mass Transfer*、*Experiments in Fluids*、*International Journal of Thermal Sciences*、*International Journal for Numerical Methods in Fluids*、*Applied Thermal Engineering*, 核工程类期刊 *Nuclear Engineering and Design*、*Nuclear Technology* 等。除了这些期刊以外,尚有大量应用多相流学科知识解决相关交叉学科领域刊物的论文,反映出多相流学科强烈的交叉学科属性。表6.1为1999~2009年上述20种本学术期刊影响因子的变化情况(影响因子=该刊前两年发表论文在统计当年被引用的总次数/该刊前两年发表论文总数)。

表 6.1 1999~2009 年期刊影响因子的变化

序号	刊名	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
1	<i>International Journal of Multiphase Flow</i>	0.870	0.606	1.382	1.210	1.289	1.383	1.306	1.274	1.137	1.497	1.514
2	<i>AICHE Journal</i>	0.651	1.645	1.793	1.626	1.667	1.761	2.036	2.153	1.607	1.883	1.955
3	<i>Chemical Engineering Journal</i>	0.637	0.677	0.847	0.671	0.992	1.383	2.034	1.594	1.707	2.813	2.816
4	<i>Chemical Engineering Science</i>	1.218	1.053	1.547	1.224	1.562	1.655	1.735	1.629	1.775	1.884	2.136

续表

序号	刊名	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
5	<i>Powder Technology</i>	0.578	0.606	0.713	0.941	0.951	0.986	1.219	1.232	1.130	1.766	1.845
6	<i>Physics of Fluids</i>	1.420	1.442	1.799	1.697	1.566	1.761	1.728	1.738	1.780	1.738	1.818
7	<i>International Journal of Heat and Mass Transfer</i>	0.286	0.654	1.240	1.260	1.293	1.220	1.347	1.482	1.500	1.894	1.947
8	<i>International Journal of Heat and Fluid Flow</i>	0.436	0.511	0.968	1.013	1.052	0.988	1.085	1.391	1.283	1.335	1.498
9	<i>Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME</i>	0.606	0.472	1.059	0.373	1.252	0.731	0.776	0.886	1.202	1.421	1.392
10	<i>Experimental Thermal and Fluid Science</i>	0.272	0.211	0.560	0.685	0.492	0.813	0.717	0.894	0.774	1.037	1.234
11	<i>Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME</i>	0.444	0.339	0.576	0.493	0.656	0.729	0.521	0.678	0.571	0.628	0.452
12	<i>Nuclear Engineering and Design</i>	0.267	0.201	0.233	0.386	0.415	0.440	0.470	0.461	0.446	0.874	0.978
13	<i>Experimental Heat Transfer</i>	0.250	0.286	0.780	0.410	0.278	0.333	0.343	0.535	0.526	0.535	0.657
14	<i>Heat and Mass Transfer</i>	0.305	0.237	0.613	0.477	0.574	0.368	0.253	0.343	0.485	0.873	0.971
15	<i>Experiments in Fluids</i>	0.614	0.702	0.821	0.923	0.757	0.851	1.062	1.112	1.259	1.854	2.008
16	<i>International Journal of Thermal Sciences</i>	—	0.169	0.436	0.497	0.574	0.600	0.738	0.991	1.048	1.683	1.77
17	<i>Chemical Engineering & Technology</i>	—	0.384	0.444	0.425	0.542	0.791	0.678	0.940	1.223	0.923	1.266
18	<i>Nuclear Technology</i>	0.449	0.398	0.421	0.458	0.339	0.446	0.326	0.537	0.534	0.622	0.657
19	<i>International Journal for Numerical Methods in Fluids</i>	0.515	0.503	0.632	0.723	0.544	0.476	0.767	0.870	0.712	0.916	1.12
20	<i>Applied Thermal Engineering</i>	0.276	0.330	0.476	0.493	0.675	0.596	0.777	0.814	0.868	1.349	1.922

从表 6.1 中可以看出, 多相流领域涉及的这些期刊的影响因子基本呈上升之势, 尤其是 2007 年以后, 各期刊的影响因子均大幅度上升, 说明多相流领域的

研究受到了越来越多的关注,多相流领域的文章和引用日益增多。以下粗略分析2001年到2010年初,中国学者在相关的国际刊物上发表有关多相流领域研究论文的情况。

表6.2对比了1997~2005年和2001~2010年Web of Science数据库所收录的20种国际期刊发表的论文中,各个国家和地区所发表的有关多相流领域的论文数量及其所占比例。从表6.2可以看出,美国一直占据榜首位置,论文发表数量占22.19%,是排名2、3、4位国家的总和,说明美国仍然在多相流领域的基础研究方面占据绝对优势。经过近年来的发展,中国内地的排名已经由第6位上升到第2位,在多相流领域的研究已相当活跃,已经培养出一支重要的基础研究队伍。

表 6.2 各国家和地区发表论文数量及比例

1997~2005 年				2001~2010 年			
名次	国家或地区	论文数	百分比/%	名次	国家或地区	论文数	百分比/%
1	美国	4514	28.2	1	美国	11505	22.19
2	法国	1354	8.5	2	中国内地	4509	8.70
3	德国	1259	7.9	3	法国	3751	7.23
4	日本	1230	7.7	4	英国	3508	6.77
5	英国	1219	7.6	5	德国	3466	6.68
6	中国内地	818	5.1	6	日本	2955	5.70
7	加拿大	656	4.1	7	印度	2395	4.62
8	荷兰	571	3.6	8	加拿大	2350	4.53
9	意大利	509	3.2	9	韩国	1822	3.51
10	印度	422	2.6	10	意大利	1679	3.24
11	韩国	408	2.6	11	中国台湾	1582	3.05
12	澳大利亚	401	2.5	12	西班牙	1340	2.58
13	中国台湾	389	2.4	13	荷兰	1323	2.55
14	以色列	378	2.4	14	澳大利亚	1188	2.29
15	西班牙	364	2.3	15	瑞士	842	1.62
16	俄罗斯	353	2.2	16	土耳其	772	1.49
17	巴西	256	1.6	17	伊朗	711	1.37
18	瑞典	187	1.3	18	俄罗斯	691	1.33
19	波兰	187	1.2	19	巴西	633	1.22
20	墨西哥	139	0.9	20	瑞典	624	1.20

表 6.3 是在上述 20 种多相流类期刊中检索到的自 2001 年到 2010 年，我国学者历年发表的与多相流有关的国际论文数量及占世界发表论文的比例。从表 6.3 可以看出，我国学者在国际期刊上发表的论文数量呈递增态势，无论是绝对数量还是相对比例都逐年增加，表明我国在多相流领域的研究工作正在迅速崛起，活跃程度不断提高。

表 6.3 中国学者历年发表论文数量

年份	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年
中国论文	95	98	123	132	189	403	459	636	716	791
世界总计	1730	1725	1711	1776	1975	4555	4583	5720	5429	5335
比例/%	5.5	5.7	7.2	7.4	9.6	8.9	10.0	11.1	13.2	14.8

在多相流领域，我国在国际影响以及国际交流与国际学术接轨方面仍然有很长的路要走。相比较而言，我国的整体水平与先进国家仍有很大差距，不仅体现在论文发表的数量，还体现在国际上发表论文比较集中的某些单位和个人。必须进一步加大我国在多相流领域基础研究和应用基础研究的投入力度，鼓励开展各种形式的学术交流与合作，才能不断促进和提高我国多相流研究的水平，努力缩小与国际学术发展的差距，尤其要关注直接服务于高新技术或直接在高科技发展中发挥关键性作用的创新性工作。

6.3 研究内容与科学问题

我国多相流学科的研究工作具有以下三个特点：第一，属于应用性基础学科，应用面极为广泛；第二，交叉性强；第三，学科的发展受到国内基础研究水平不够的限制。鉴于以上特点，为了改善我国多相流的研究现状，赶上甚至超过国外的发展水平，应该强调重视从新现象、新的模型、新方法（包括实验的、测量的、计算的）等方面重新审视本学科的研究工作。具体强调以下四个方面：一是在研究深度上，继承和发展国际现有的研究方法和思路，结合我国工业发展的具体需求特点，深入研究解决现实中制约我国国民经济发展的科学与关键技术基础问题；二是加强原创性，在广泛深入认识国际科学前沿基础上，寻找突破口进行创新研究；三是在研究广度上，强化学科交叉，为其他学科和工程的科学研究和应用问题提供解决方案；四是要体现现实性，要立足本国实际，从欠发达的工业过程和自然环境中提炼科学问题，并使研究成果转化为生产力，为我国的现代

化建设添砖加瓦。特别需要强调以下四点：①强调基础研究是一切创新的源泉；发现新现象，建立新模型，发展新方法（试验、测量、计算），加强传热、传质及多相流本构关系的深入研究，建立新的或更准确的本构关系式。②加强学科交叉与拓展，积极吸取相关学科，如流体力学、分子动力学等学科的研究成果，使相关学科得到协调发展，同时扩展本学科除在能源学科之外的学科，如化工、航天、环境及生命科学等学科的应用。③注重应用技术基础平台的研究——大型商业软件研发。开发具有自主知识产权的基础应用软件对国防建设、国民经济发展等均有重要的意义。大型商用软件市场原为欧美所垄断，如熟悉的大型计算流体力学软件 FLUENT, CFX, StarCD 等。日本近年来有很好的进展，CRADLE SC/Tetra 软件使日本在 CFD 商用软件市场占有一席之地。中国也需要发展具有自主知识产权的应用软件平台。考虑到目前商用软件尚有许多不足之处，如多相流、多场耦合问题尚不能给出较为精确的模拟结果，可以结合国内的研究进展及最新研究成果，在促进相关学科基础研究的同时，开发出有竞争力的软件平台。④加强多相流测试新方法、新技术研究和仪器的开发，改变目前多相流研究及传热、燃烧等研究中大型关键测量技术和仪器主要依赖于国外的局面。

多相流学科的研究内容和科学问题主要包括如下方面。

6.3.1 多相流基本现象与规律

1) 多相流相界面运动、变化和相互作用与非线性动力学

物质世界的本质是运动与相互作用，多相流科学集中体现了复杂运动、变化与相互作用的特点，这是基础科学需要回答而未能完全回答的问题，无论在微观层面还是在介观、宏观相空间结构与相浓度分布的不均匀性、状态的多值性、过程的不可逆性，相间界面的动力学行为都是物质世界的物理、化学本质的典型与普遍性质；工程热物理科学理论是与物质结构与基本粒子、纯数学等基础科学同等重要的科学基础，同时又在联结人类活动的有序化及目的化方面更具有特殊优势的学科。

2) 颗粒非线性动力学

- (1) 变形气泡的非线性热动力学；
- (2) 变形液滴的非线性热动力学；
- (3) 颗粒与颗粒群在流场中受流体动力作用力；
- (4) 颗粒-气体湍流相互作用；
- (5) 稠密气固两相流中颗粒间以及颗粒和壁面间碰撞和聚集规律。

3) 湍流与非牛顿流

多相流湍流，有传热过程、化学反应过程的多相流湍流，以及向非牛顿流体的扩展。

- 4) 多相流的等效热物性研究
- 5) 多尺度数值方法与新测量方法和技术研究
- 6) 波的产生、传播及其不稳定性理论
 - (1) 连续波、动力波的生成机理、传播、发展规律与基本理论;
 - (2) 密度波、压力波、浓度波等形成、发展及其演变的理论及规律;
 - (3) 界面波形成、发展及其演变的理论及规律;
 - (4) 波的复合及其演化规律与非线性数学描述。
- 7) 高压气液两相流理论
 - (1) 超临界及超超临界锅炉传热与水动力特性研究;
 - (2) 大型核电站安全传热研究;
 - (3) 研究堆冷中子源氢系统循环特性试验研究;
 - (4) 换热器传热强化研究。

6.3.2 数值模拟理论与方法

- 1) 气(汽)液两相及多相流变形界面的数值模拟方法
 - (1) 界面跟踪;
 - (2) 界面捕捉;
 - (3) 多尺度气液两相流数学模型与湍流模型的发展与完善。
- 2) 气固两相流数值模拟方法
 - (1) RANS 模拟;
 - (2) 大涡模拟;
 - (3) 直接数值模拟。
- 3) 气液固三相流数值模拟
- 4) 局部参数测量中的数学理论与物理模型及数值算法

多相流和传热的测量方法越来越多地涉及数学、物理、化学等基础学科的发展,如 PIV 涉及大量数据处理的算法问题、图像记录方式、计算机技术、光学等,采用光散射和超声散射测量颗粒两相流需要研究光和超声在固体、气体和液体介质中的传播和散射机理和病态方程算法等,多相流流动过程随机噪声中所包含大量信息的分析处理算法,在各种测量技术中的反演算法等的研究。

6.3.3 能源高效转化和清洁利用的多相流

- 1) 常规能源高效节约的多相流理论基础
 - (1) CO₂ 减排、地质封存以及储存与循环利用;
 - (2) 粉煤加压催化气化;

- (3) 深水油田及油气田二次开发中的两相流与多相流;
- (4) 能源清洁利用过程中的反应多相流。
- 2) 能源可再生转化利用的多相流理论基础
 - (1) 太阳能规模制氢中的化学反应多相流;
 - (2) 燃料电池中的多尺度多相流热物理;
 - (3) 新型堆及热核聚变反应堆多物理场多尺度多相流热物理问题。

6.3.4 多相流的实验与测量新技术及方法

在多相流及其复杂传递现象和机理研究的实验模拟与参数测量中,不同的研究内容很可能需要特殊的测量方法,不存在通用测量方法,实验室得到很好应用的多相流测量方法或技术,在工业多相流测量中并不一定也能得到很好的应用。为此,需要充分利用声、光、电、磁等各种效应来研究和发展新的测量方法和技术,主要应该是集成和综合多种测量原理和方法的先进技术。多相流测试新方法的研究大致可以分成如下几类:

1) 新的两相流测试方法

(1) 光散射两相流测试方法,包括消光法、前向散射法、角散射法、后向散射法、脉动法、起伏谱分析法等;

(2) 层析成像测试方法,包括电容法、电阻法、光学法、超声法、静电法等;

(3) 核磁共振成像测试方法,包括时间飞跃法、相位位移法;

(4) 超声测试方法,包括超声衰减、超声声速、超声阻抗;

(5) 激光诱导荧光等测试方法,如激光诱导荧光、拉曼散射;

(6) 图像测试方法,包括高速 CCD 摄像、三维图像、显微动态图像和图像处理算法等;

(7) 光谱测试方法,如红外傅里叶光谱,紫外傅里叶光谱、辐射谱、吸收谱等;

(8) 射线、微波测试方法,如 X 射线、微波、中子射线、太赫兹等;

(9) 光声、电声测量方法等。

2) 新的信息处理方法

(1) 非接触流速、流量数据处理方法;

(2) 软测量方法。

3) 常规测试方法与新的信息处理方法结合

(1) 模式识别;

(2) 随机信号处理,小波、人工神经网络、最优化。

4) 超高参数及特殊多相流及传递过程的实验模拟与参数测量方法

(1) 超临界及超超临界压力下流动、传热与水动力特性实验方法和参数测量;

(2) 大型核电站超高热负荷下的两相流及安全传热实验方法和参数测量;

(3) 堆冷中子源氢系统循环特性研究试验方法;

(4) 微小尺寸流道内两相流与传热特性研究的实验方法和参数测量;

(5) 海上油田高压油气水两相及多相流的实验方法和参数测量。

5) 燃烧过程中的两相流动、浓度场、温度场的测量方法和技术

(1) 燃烧过程中两相流动与温度场和燃气成分浓度场的同时在线测量方法;

(2) 新型发动机中高速脉冲燃烧中的多相流动速度场测量方法。

6) 油气水多相流的在线测量理论与技术

(1) 油气水多相流动各分相流量在线测量方法;

(2) 油气水多相流各相速度在线测量与模化方法;

(3) 油气水多相流各相浓度、界面浓度测量与模化方法;

(4) 油气水多相流流型在线测量与模化方法。

7) 高浓度气固两相流测量技术

6.3.5 多相流与其他学科的相互渗透及交叉

1) 微重力多相流

2) 生物、医药、医学科学中的两相及多相流

3) 材料制备与加工中的多相流热物理

4) 冶金工程中的多相流

5) 能源高效和可再生转化的微多相流光化学与热化学反应理论

6.4 重点支持方向

6.4.1 多相流基本现象与规律

多相介质在相场空间结构与分布不均匀性、状态多值性和过程不可逆性是多相流最基本最突出的特征,界面的传输现象、流体微团及颗粒群随机运动与各组分、各相间相互作用使问题具有不规则和非线性,流动结构形态、相分布与状态参数变化稳态下就已十分复杂,在快速启停及变负荷运行系统中,相变、相界面传输过程的瞬态、空间微层特征所引起的时空尺度超常及所处力场特性的变化,使得我们至今难以准确系统地掌握多相流动与传热传质过程的规律。

两相及多相流传递,包括质量、动量和能量的传递与交换,均必须通过相界面来进行,相界面结构形状变化与界面波动的力学属性、相界面特征参数如局部相分布、相界面浓度分布(单位混合物容积内所包含的相界面面积)特性等对多相流过程描述及其准确预测有着决定性的意义,而相分布、界面浓度分布又与多相流体内部的湍流脉动相互影响,因此界面的动力学形为及其模化研究十分重要。多相流传递过程基本现象以及共性规律的研究主要包括多相流非线性动力学与热质传递、多相流动体系的相变传热强化理论等,研究的难点和重点主要是界面数值模拟方法,可变形气泡和液滴的非线性热动力学,多相流中波的产生、传播及其不稳定性理论,瞬态过程流动传热与临界及超临界效应,双流体数学模型的改进和完善,多相流相界面特征参数的测量与预报方法等。

运用有关多相流非线性动力学与热质传递过程的基本现象以及共性规律的研究成果,建立大型热能动力系统与过程内部多相流与传热及其节能诊断和安全可靠性理论,探索新的热力循环与热力系统以及先进能源转换系统的运行与控制理论,着重解决超临界、超超临界大型火电机组,先进核反应堆热工水力特性等方面的核心科学问题,包括高温高压汽液两相流与极限传热的基本理论与规律、多相流流动系统不稳定性及其诱发振动、多相流燃烧及污染控制、高温分离与除尘、强化传热与节能理论等。

6.4.2 多相流数理模型与数值模拟技术

1. 复杂区域非牛顿多相流界面先进捕获方法及可变形颗粒动力学

由于多相流固有的复杂性,界面的捕获、特别是如何获得精细而锐利的高分辨率一直是多相流数值模拟领域的一个难点,尤其是可变形颗粒在非牛顿流体作为连续相的复杂几何区域的多相流动日益受到强烈的关注,发展此类问题的界面先进捕获方法并研究可变形颗粒动力学是未来学科发展的重要研究方向。

研究多尺度、非牛顿流变和两相耦合的复杂流体流动规律描述模型和求解方法,引入各种非牛顿流体本构方程研究复杂区域非牛顿多相流体动力学,研究描述复杂区域可变形颗粒界面动力学行为的界面先进捕获方法和无网格方法,前者包括基于非结构化网格的VOF/Level Set方法和非结构化网格高效生成算法,后者包括移动粒子半隐式方法(MPS)、光滑粒子动力学方法(SPH)、格子-玻尔兹曼方法和蒙特卡洛方法等;研究可变形颗粒在非牛顿流体中的受力和运动规律;研究非牛顿流体湍流模型的构建;研究非牛顿流体与可变形颗粒的相互作用规律以建立多相非牛顿流体的“双向耦合”模型;研究适用于非牛顿多相流界面测量的电容/电导探针测量技术等界面参数的测量方法,以及流变特性的高精

度测量与预报方法,包括剪切黏度、弹性或塑性、拉伸黏度等的有效测量方法,非牛顿多相流体内颗粒团聚行为及其与流变特性关系的物理模型及高效数值算法;研究颗粒团聚结构的观测方法及其导致的流体新功能(如减阻、动脉硬化等)、颗粒团聚结构的低压损高效强化与破坏方法等。

2. 气固多相流的全尺度数值模拟

随着科学技术的进步,人们对自然现象和工程过程的了解在尺度上不断扩展,大到天文现象的太阳系外的宇宙空间,小到基本粒子的层次,都不断取得新的认识。在多相流研究方面也是如此,多相湍流研究从雷诺平均模拟到大涡模拟和直接数值模拟等,反映了人们的认识正不断深入到细观和微观现象中,细观和微观模拟的结果对认识现象的本质和内在机理,构造合理的数学模型是非常重要的。在气固多相流的流动、传热和燃烧中,运动的固体颗粒相和流体相之间存在着十分复杂的动量、质量以及能量传递。相间相互作用的机理十分复杂。传统的气固多相流的数值方法虽能够对一些宏观现象进行理解和解释,但对于气固多相流中的微观现象和作用机制,需要用全尺度的数值模拟方法即气固多相流的真正的直接数值模拟来进行研究。

3. 气液两相喷雾流动和燃烧的数值模拟

作为能源利用,尤其是高品位能源利用的主要形式之一,气液两相喷雾燃烧广泛存在于动力、航空、航天、化工、冶金和机械等关键工程领域,如工业锅炉、航空发动机、燃气轮机和汽车发动机等装置内的燃烧过程。喷雾燃烧涉及湍流、雾化、蒸发相变、多组分传输和多相化学反应,它是受湍流流动、传热传质和化学反应控制的极其复杂的物理化学过程,存在着相内和相间的质量、动量和能量耦合,如液相雾化动力过程、气相湍流流动和气相湍流燃烧的相互作用、液滴蒸发和湍流燃烧的相互作用、液滴扩散和湍流流动的相互作用以及两相燃烧与固体壁面的相互作用等。因此,开展喷雾燃烧的基础研究不仅具有十分重大的科学意义,而且具有极其广泛而现实的应用前景。

喷雾燃烧的关键部件之一是燃烧室,其最初的设计是以经验、半经验设计方法以及大量的研究试验为基础的。由于其极端复杂性,喷雾燃烧的若干关键基础问题亟须进一步研究,包括液体雾化的动力学和模型、喷雾燃烧的火焰规律、液滴蒸发与湍流燃烧的相互作用、气态污染物 NO_x 和烟尘颗粒炭黑的形成和控制以及复杂几何结构的影响等。为了探索喷雾燃烧过程的内在规律,并对其进行有效的控制和合理的运用。采用高级数值模拟方法包括大涡模拟、直接数值模拟和现代激光测量技术对气液两相喷雾燃烧进行系统的研究,通过研究揭示两相喷雾燃

烧中液体的雾化、液滴的蒸发与气相湍流燃烧的相互作用规律、液滴的局部聚集对两相燃烧火焰的影响规律、气液两相喷雾燃烧的火焰规律和喷雾燃烧过程中污染物的形成规律,发展相应的雾化模型、大涡模拟多相燃烧模型,并把仿生流体力学领域广泛应用的内嵌边界法引入到两相喷雾燃烧的高级模拟中,在结构化网格中高效地模拟复杂几何结构燃烧室的影响和有限尺寸颗粒的变形问题。

4. 非牛顿两相流体

非牛顿流体多数条件下具有复杂触变性,并产生新的机能。该流变特性和新机能往往是由其内部微观结构的动力学行为决定。如表面活性剂胶束粒子的团聚网状结构产生流动减阻,微细气泡在液体中的团聚产生流动减阻,动脉血管中红细胞在内曲面团聚会导致动脉硬化等,其流动性能和机理与一般的牛顿流体相比更加难以把握和了解。对于非牛顿两相流体,有必要考虑非牛顿流体复杂流变特性的非牛顿多相流数学模型,以准确描述非牛顿流体的流动规律,揭示其特有的流动和传热机理。

6.4.3 高新技术中的两相流

1. 微纳系统可控多相流动、传热及化学反应基本现象、共性规律及应用研究

微纳系统中的多相流动经常伴随着传热或化学反应,构成功能化微纳系统的基础。例如,控制光照可实现含有光敏剂液滴的往复运动,构成液滴往复运动的微执行器;在可控电场作用下液滴的往复运动可将热量从高温端传递到低温端,构成数字化传热的基础;采用合适的毛细管系结构可形成多重包裹的微液滴,可制备精细化工中的化妆品、药物微胶囊等。在航空航天热管理及流动控制中,存在着对功能化微纳系统的重大需求。

多相微纳系统的难点归纳为:①存在着常规尺度系统中不存在或易被忽视的微尺度效应、微弱势差等;②强烈的多学科交叉性;③相界面的精确测量非常困难。

以航空航天、信息及生物技术中功能化多相微纳系统共性规律的掌握及系统集成成为目标,重点研究采用表面张力、表面改性、新的微细结构、电场、磁场、光化学反应等方法实现多相微纳系统中相界面的精确控制,实现微纳系统的功能;研究采用微细加工技术制备功能化微纳系统;研究微纳系统中汽液、液固等多相体系在控制信号作用下相界面的精细捕捉、速度场、温度场、浓度场、液膜厚度等的测量原理及方法。

建立描述多相微纳系统中流动、传热、能质传递、化学反应和相界面稳定性

等的本构方程,正确刻画微细效应;开展理论和数值研究,发展新的高精度、高稳定性的相界面捕获或追踪方法;发展新的多相微纳系统的多尺度、跨尺度数值模型等。形成多相微纳系统的基本理论,丰富和发展极端空间和时间尺度下的多相流学科。有关的分支方向主要有:①微通道内单个气泡或液滴的动力学行为。研究通道尺度、表面粗糙度、亲水性和疏水性等对气泡动力学的影响,揭示共性规律。②微纳系统的理论或数值模拟。针对典型微通道流动和传热问题,在特定条件下寻求具有普适意义的理论解;发展微通道内多相界面捕获及追踪方法,提高求解精度及收敛稳定性等;在纳米尺度,重点发展分子动力学及格子-玻尔兹曼数值模拟方法。③微纳系统制备和集成。发展基于硅、塑料、金属等为基底材料的微细加工技术,发展微系统集成方法。④微纳系统中相界面控制原理与方法。发展新的微细结构、表面张力、电场、磁场、光学等原理控制微系统中气泡或液滴的运动。⑤种子气泡传热原理与技术。深入研究种子气泡传热原理与技术,取得系列成果,为温度敏感器件的精确控温提供一种实用原理与技术。⑥数字化传热原理与技术。发展液滴往复运动型数字化传热原理与技术,达到微传热的可控性。⑦微通道沸腾传热共性规律的掌握。在国内外现有研究基础上,补充完善新的实验数据,开展理论和数值模拟,以期获得气泡动力学、流型、传热、稳定性、临界热流密度等的共性规律,提出理论或半理论计算关系式,为微蒸发器的设计、制造及运行奠定基础。⑧微通道相变传热的热力学非平衡性。已经发现,微通道相变传热存在着强烈的热力学非平衡性。研究热力学非平衡性的产生、控制及弱化原理与方法。⑨高势差梯度对微通道两相流的影响。由于通道狭小,速度、温度、浓度的空间梯度被放大,研究高势差梯度对微通道两相流的影响。⑩微小卫星及其他高新技术中的两相流。针对微推进系统对推力的高精度控制要求,发展相变型微推进系统,研究其气泡动力学及相变传热规律。

2. 微重力沸腾传热与两相流

目前,国际上对微重力气液两相流动与传热的研究,逐渐转移到对相关细观过程与机制的探索,我国近期的研究工作也同样强调了这种趋势。例如,在沸腾传热方面,提出以具有若干人工空穴的加热面上气泡的形成、发展、脱落及其运动为主要研究对象,通过改变加热功率或加热面温度、压力、液体温度等实验条件,实现微重力池沸腾起始过程及随后的稳定沸腾过程,并测量微重力环境中传热效率等宏观平均的参数以及加热面局部温度分布、气泡周围液体内部微流动结构等局部参数的变化,综合利用地面实验、地基短时微重力实验和返回式卫星或飞船实验等多种实验手段,结合数值模拟研究对微重力环境中沸腾传热特性、气泡形成-成长-脱落过程特性、液-气-固相互作用、液体内部热毛细流动及其对传

热的影响等进行深入研究,以获得微重力沸腾过程中气泡动力学特征及传热特性数据,加深对相关流动与传热规律的认识。

另外,针对空间应用(尤其是载人航天应用)的两相系统技术开发,也已成为国内外学术界与工程界共同关注的重点,这些方面突出的例子包括 ALPHA 磁谱仪轨迹探测器机械泵驱两相热控系统、电解制氧装置等。

未来这些研究方向将有助于对微重力两相流动与传热规律的认识,极大地促进该学科的发展及其在相关技术领域的应用。

6.4.4 多相流及传递问题的测试方法

在多相流、燃烧等许多领域,测量技术的发展已极大推动了工程热物理学学科的发展,最典型的是 PIV 已成为气动力学、多相流、燃烧、传热等许多领域研究不可或缺的测量方法,对这些领域的机理研究起了很大作用。另外,近代出现的过程层析成像方法,将传统的热物理场的“点”测量拓展到实时的“场”测量。但随着科学研究的深入,测量新方法的发展不足也成为限制这些领域机理研究进一步发展的瓶颈,如 PIV 测量过程中受到可视度限制的问题、过程层析成像的空间分辨率受到反问题中信息缺乏影响的问题等。对此,应坚持不懈地开展基于新的物理机理的多相流测量新方法和机理的研究:

(1) 基于新物理原理的多相流测量方法研究,尤其是对二维和三维场参数测量的新方法及机理的研究。近年来,物理学、数学、电子技术和计算机技术等的发展,使得许多原来不可能或很难实现的测量方法成为可能,而对多相流机理的深入研究也迫切需要能测量多种场参数的多相流测量方法,因此,必须发展基于新的物理原理和技术的测量方法显得十分必要,如太赫兹、飞秒激光、量子超声等原理的多相流测量方法。

(2) 针对我国的能源结构特点以及节能减排的紧迫任务,为了提高燃烧效率,降低污染物排放,研发能源转换过程的机理研究的测量方法,以及过程参数的测量方法,如具有燃烧、传递过程的时-空间解析功能的测量方法。具体内容包括:①燃料特性的在线快速检测方法;②燃烧产物组分(species)空间分布的快速现场测量;③低激励能或被动式(passive)的安全并不受测量环境限制的热物理量场测量方法;④结合多相/多组分介质分布的燃烧场的非侵入式热物理参数快速空间分布测量方法。

(3) 针对洁净能源和可再生能源的利用,研究新型和洁净能源转换过程中介质的热物性、物相分布与输运的实时与空间分布的测量原理和方法。

(4) 针对全球关注的智能电网、CO₂ 捕集、封存等长期课题,研发热物理参数的遥测方法、大/小尺度并存条件下介质空间分布与运移过程的测量方法,多

机理传感器网络的集成,热物理场测量中不同机理信息的多目标协同优化等问题,集成气象、地理信息、热物理模型、分布式传感的风能转化预测方法等。

(5) 对极端条件,如超低/超高多相流浓度、高温、高压、高速、瞬态及非稳态、微米尺度、纳米尺度下的多相流参数测量方法的研究。在这些极端条件下,许多常规的测量方法及技术已不再适用,必须发展新的测量方法以适应极端条件的多相流研究进展。

(6) 工业应用中复杂多相流现象的在线测量新方法研究。在工业应用中经常存在如变参数多相流、带化学反应多相流等复杂多相流过程,在许多场合,这些多相流参数是相互影响的,对这些复杂多相流过程的研究需要注重突破单一感应机理测量方法,开发新的能同时测量多个参数的测量方法。

(7) 基于多种效应集成和融合的多参数复杂场测量方法研究。对许多复杂多相流场的测量,基于单一原理的测量方法已无法胜任,而多方法集成和融合的多相流测量方法将有可能解决复杂多相流多参数场的测量,如将光散射、受激荧光辐射、光谱吸收等方法集成,有可能实现同时测量浓度场、温度场、粒度场和速度场的同步测量。因此,多方法多机理集成或新的测量方法将会成为复杂多相流场测量的重要方法。

(8) 热物理量场的可视化、量场参数数值化测量方法,包括融合热、力,电、光、声等机理的三维过程 CT 方法,基于极度稀疏原始数据而对物理现象的超高速重建方法,以及由离散热物理参量引导或热物理模型/数值方法指导的直接测量和软测量方法等。

(9) 多相流和多组分过程的非侵入/非干扰测量技术,常伴随信号的缺乏和非线性逆问题的求解。对此,多机理传感器的融合成为前沿技术和发展方向;在参数重构领域,多机理信息的融合则成为关键的方法。重要研究方向包括对多相流分布参数重建的泛函的构建以及多目标优化的求解方法。

(10) 生物、医学等学科中的特殊两相流的测量新方法和新技术研究。

6.4.5 常规能源高效节约的多相流理论基础

1. CO₂ 减排、储存与循环利用的基础理论与关键技术

我国高耗能工业发展过快,钢铁、水泥和电力等行业的 CO₂ 年排放量高速增长,煤化工、石油、化工、汽车、有色冶金和建筑等行业的 CO₂ 排放量也呈快速增长的趋势。2020 年 CO₂ 排放为 15.43 亿~21.74 亿 t 碳,比 2003 年提高 82%~156%,我国富煤、贫油气和水、耕地资源紧缺、生态比较脆弱,全球气候变化对我国的影响可能极为严峻。我国 CO₂ 减排压力越来越大,必须刻不容缓地进行

CO₂ 减排相关多相流动基础研究。

根据国际上 CO₂ 减排技术的发展趋势, 集中开展煤粉低污染燃烧、火力发电厂中锅炉烟气为矿物捕集及碳酸盐化储存机理和不同液体处理剂对 CO₂ 的吸收特性及其改性方法、二氧化碳合成低碳烯烃的资源化利用技术等学术前沿和热点问题, 运用多相流、传热传质学、化学反应动力学等学科的理论, 深入研究低 NO_x 燃烧器 (LNB)、空气分级 (OFA)、再燃烧技术 (reburning) 和选择性非催化还原工艺 (SNCR) 分任务联合脱除 NO_x 的技术; 研究不同能源动力系统的“碳”传递规律, 阐明能量转化利用与 CO₂ 分离一体化原理, 探讨能源动力系统中“碳”的形成、迁移、转化机理, 揭示能量转化利用和 CO₂ 分离过程之间不可逆耦合特性, 研究 CO₂ 在醇胺溶液中吸收过程和溶液再生过程中的能质输运现象, 建立 CO₂ 吸收分离过程的物理模型并发展相应的数值算法, 提出先进的 CO₂ 物理化学处理方法, 采用固体及液体预处理方案, 构建先进的 CO₂ 综合处理与利用系统; 研究基于 CO₂ 为工作介质的低温余热发电技术、CO₂ 超临界传递现象、CO₂ 分离 PSA 方法、超临界 CO₂ 绿色化工新体系, 最终实现 CO₂ 的生物及化学转化利用, 逐步建立适合中国国情的碳隔离技术体系, 为我国应对全球气候变暖打下坚实的科学技术基础。

2. 粉煤加压催化气化的基础理论与核心关键技术研究

我国以煤为主的能源供应关系在相当长的时间内不会改变, 先进煤气化技术是洁净、高效地利用煤炭的主要途径之一。《国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006—2020 年)》明确将大力开发煤气化和以煤气化为基础的多联产系统技术作为能源领域的优先研究主题之一, 开发先进的高温、加压 (2.0 ~ 8.5 MPa) 操作的煤气化技术是实现气化能力大型化的重要途径。开展加压条件下粉煤催化气化技术研究, 对于提高粉煤气化的一次碳转化率, 降低操作温度, 实现我国煤气化大型化具有重要的意义。

粉煤加压催化气化过程涉及多相多组分流动和反应动力学与热力学的耦合, 属于工程热物理、流体力学、化学、材料等多学科的前沿交叉, 开展相关研究具有重要的学术意义和工程应用价值。研究加压与催化作用下多尺度多相流动换热与化学反应动力学、催化机理, 发展粉煤加压催化气化炉的设计理论与方法, 包括: 在各组分物性精确测量的基础上建立热力平衡计算模型, 通过颗粒团聚与沉降的示踪, 建立气化炉内复杂多尺度多相反应流动模型; 结合多相流场的 PIV 和 PDPA 测量, 研究加压气化炉内的流场结构、揭示多尺度多相流动反应机理; 探索加压与催化条件下的气化炉粉煤气化过程的反应动力学与热力学机理; 研究开发新型高效催化剂, 筛选并开发新型高效催化剂, 考察加压催化气化条件下催化

剂活性和选择性;深入了解煤催化气化反应历程,在此基础上根据加压催化气化机理建立动力学模型。

3. 深水油气开采中流动安全保障与水合物风险控制技术

相对于陆地而言,海洋的自然环境十分恶劣,建设和维护石油生产和输送设备的费用极其昂贵,所以对海上油、气田的开发一般采用卫星状的平台开采模式。显而易见,平台设备的流动安全和输运安全问题是维系整个海上油、气田开发的最基本生产要素。未来应以海洋油气开采平台为研究对象,研发基于平台的油、气安全流动保障技术和水合物风险控制技术的集成工艺,为我国深海领域油气开发提供理论指导和相应的技术支撑。当前,由于多相流的复杂性,混输管道内威胁流动安全的一系列问题虽有一些研究进展,但仍然没有很好地解决,而国内现有的技术水平与国外存在很大差距,在严重段塞流预测及控制技术、多相流腐蚀机理、多相流在线测量等方面基本是空白,对热力学抑制剂和防聚剂的研究刚刚起步,其对水合物生成的影响机理尚缺乏可靠的理论模型和实验研究结果。

以节约海洋平台工程投资及运行费用、充分利用伴生天然气资源并减少环境污染为目的,研发基于深海海洋油气平台的油、气混输管线严重段塞流控制与消除技术,结合探针与瞬时压力测量技术发展严重段塞流的流型在线识别技术、建立考虑气泡尾波作用与加速压降修正的段塞流跟踪模型,探讨发生各种流动现象的物理机理,研究有效消除严重段塞流现象的方法;研究油/气/水多相流流量在线测量技术,包括流型对流量、组分、压力、温度等参数的影响规律和基于多相流体不分离条件的多相流流量测量技术;研究节能减排的管线加热、保温、防蜡、减阻技术以及水合物抑制技术,包括多相流加速金属管道腐蚀机理和油/气/水多相混输流动加速腐蚀的预测模型、动力学抑制剂和防聚剂作用于水合物生成的机理、实际原油在不同管流剪切速率下的结晶机理与规律、减阻机理及其规律等。

4. 水合物风险控制研究

水合物风险控制主要研究典型水合物区域沉积物基础物性、分解过程中结构形态的变化规律、分解后所形成的气、水、冰、砂等多相流动、传热和传质机理、基础实验方法和分析方法研究,初步建立天然气水合物分解过程的多相流动、传热和传质控制模型,为天然气水合物风险控制提供理论依据。主要研究包括:①含水合物的沉积物基础物性研究。主要开展水合物动态分解过程中水合物藏参数、含水合物的沉积物热力学参数的测量方法和手段的研究,建立水合物基础物性(水合物分解过程中的传热传质特性)的实验测量手段和理论分析方法。

研究含水合物沉积物形态和储层参数变化规律,如致密多孔介质的骨架特性、典型沉积物中水合物组成和类型分析、储层特性参数的测量与分析、分解过程中储层综合特性变化和理论模型研究等。②沉积物中天然气水合物相态变化规律研究。天然气水合物分解过程中天然气、水合物、水、冰、砂等多相、多组分的相态变化过程,通过对南海北部典型水合物区域沉积物的相态变化规律研究,获得影响沉积物中水合物相态的主要因素,对后面深入研究天然气水合物分解过程中多相流动、传热和传质规律提供重要的理论依据。研究包括:典型沉积物中天然气水合物相平衡实验模拟规律研究、天然气水合物分解过程中相态变化的理论模型等。③天然气水合物分解过程中多相渗流传热和传质控制理论初步研究。天然气水合物开采中存在着天然气、水合物、水、冰、砂等多相、多组分的多相流动与渗流过程,同时伴随着多相渗流的传热和传质过程。研究水合物分解过程中多相渗流传热、传质和控制机理,为今后天然气水合物开采奠定理论基础。研究包括天然气水合物分解过程中多相流动规律研究,如水合物藏分解过程中的水合物分解动力学和多相流特性参数研究、水合物藏分解过程中多相传热传质过程研究等。

5. 油气田二次开发中的多相流热物理基础理论与关键技术

目前,中国石油产量的70%仍然来自老油田,其剩余可采储量仍相当可观。老油田二次开发是一项艰巨复杂的系统工程,多相流热物理是重构地下认识体系、重建井网结构、重组地面工艺流程等三个核心内容中的关键理论支撑,同时也是石油工程多相流热物理发展的挑战,因此开展针对性研究,对从根本上改变地下自然资源的利用和获取程度、最大限度地实现中国石油资源可持续发展意义重大。

未来应开展多相渗流理论和井筒内多组分多相流相态及流型理论研究,发展低渗、超低渗油气田的增产开发新技术、单井多相流量在线计量新技术和一级半集输流程新工艺。从多相流热物理角度进行油气田二次开发以提高石油自给率,研究复杂地层水/水蒸气驱油的多相渗流与传热模型,建立油气水及天然气的相平衡与相态计算方法、研究渗流特性及波及系数的规律;研究井筒多组分变质量多相流动模型,包括结合多相流测量新理论研究流量在线测量新方法、开发研制井下油气水多相计量新技术,建立井下油气水多相计量的数学物理模型和评估方法等。

6. 能源清洁利用过程中的反应多相流动理论

以煤、石油、生物质等能源的转化利用过程为对象,研究复杂的多相反应机

理和污染物的控制途径,从宏观、微观和介观角度分别建立相应的数理模型和大规模高效并行计算方法;研究湍流喷雾雾化的机理及其对污染物生成的影响;发展精确的液滴蒸发、煤粉/生物质颗粒气化和相界面捕捉模型;研究相变过程(蒸发和气化)与湍流反应的相互作用,考察反应颗粒与气相湍流的作用规律;发展精确的多相湍流燃烧模型和污染物的生成模型,并与复杂的几何边界集成起来,进行流固耦合、热固耦合、壁面材料力学的综合研究。把反应多相流的微观机理研究、宏观应用研究、介观理论研究结合起来,对相关的能源高效、清洁利用过程进行跨尺度、多物理、多化学场耦合的集成模拟和应用研究。

6.4.6 能源可再生转化利用的多相流理论基础

1. 太阳能规模制氢与燃料电池耦合系统及其内部多相多物理及化学过程的理论及关键技术研究

燃料电池发电技术是21世纪首选的洁净发电技术,国家“十五”和“十一五”规划以及《国家中长期科学和技术发展规划(2006—2020年)》都把燃料电池技术列为重点发展项目。根据太阳能光催化和生物质热化学规模制氢技术以及质子交换膜和固体氧化物燃料电池各自的特点对其进行耦合,对于高效、洁净和便捷的实现太阳能的高品质利用具有至关重要的意义。

太阳能规模制氢过程和燃料电池中都存在着异常复杂的多相多物理过程,将两种技术进行耦合更是大大增加了系统的复杂性,必须针对耦合系统内部的复杂多相多物理过程理论及关键技术开展深入的研究。对于太阳能热解生物及水制氢与固体氧化物燃料电池发电耦合系统而言,太阳能热解生物及水制氢过程是高温、高压的复杂物理化学过程,固体氧化物燃料电池内部存在着高温下伴随着复杂电极过程的传热传质现象。对于太阳能光解水制氢与质子交换膜燃料电池发电耦合系统而言,太阳能光解水制氢过程中催化剂、水和氢气构成复杂的多相流动系统,同时伴随有光解水的光化学反应,质子交换膜燃料电池内部存在着水蒸气、液态水、反应气体等多相成分的传热传质和电化学反应现象。要实现两种制氢过程与两种燃料电池发电技术的有机耦合,必须针对耦合系统内部的复杂多相多物理过程理论及关键技术开展深入的研究,以最终实现高效、洁净、便捷利用太阳能的目标。

具体研究内容包括:基于计算流体力学、化工热力学和电化学理论建立能够对固体氧化物燃料电池、质子交换膜燃料电池内部传热传质和电化学过程进行准确描述的数学模型,深入研究微观尺度的传输模型、多孔介质内考虑毛细压力作用的传输理论;结合实验测量研究燃料电池的内部机理;开发高效、低成本的质

子交换膜燃料电池新型催化剂（非 Pt 催化剂或新型催化剂担载技术）和双极板材料以及固体氧化物燃料电池新型电极材料，并利用激光拉曼光谱仪、X 射线荧光光谱仪、比表面分析仪和电化学阻抗测试仪等多种实验设备对各种材料的特性进行表征和评价；研究耦合系统内部复杂的多相多物理过程，建立耦合系统匹配构建原则，建成太阳能热解生物及水制氢技术与固体氧化物燃料电池、太阳能光解水制氢技术和质子交换膜燃料电池耦合示范系统，并对耦合系统进行优化。

2. 超临界水堆与快堆结合的新型堆及热核聚变反应堆

《国家核电中长期发展规划》已明确指出：2020 年我国核电装机容量将达到 40GWe，堆型以热中子压水堆为主。如此庞大的核电装机容量会使我国届时面临铀资源短缺和高放射性废物处置等难题。另外，2020 年以后，我国即使保持 2020 年核电所占发电总量之比例，仍需批量建设新核电站。堆型的选择主要根据新概念堆型开发的成熟程度及其自身优势来决定，而目前从技术成熟发展程度和新概念堆型的自身特点来看，在我国研发超临界水冷快堆最具现实性。故超临界水冷快堆也应当是保证我国核电可持续发展的重要战略性选择之一。由此预见，未来中国发展超临界水冷快堆是更高效效率利用和节省铀资源最现实的路径，超临界水冷反应堆最有可能成为支持中国核电可持续发展的重要堆型，部署研究能实现发电、增殖和嬗变的多用途超临界水冷快堆系统不失为一个明智选择。

结合国家发展核电的重大需求，探索超临界水堆与快堆结合的新型堆，在已有的超临界水冷热中子堆概念设计基础上进行快中子谱堆芯设计，合理的设计目标，获得燃料材料组成和燃料棒、组件及堆芯结构布置等参数，基于堆芯物理和热工耦合计算完成百万千瓦级超临界快堆堆芯概念设计。基于上述堆芯设计开展核燃料增殖和长寿命放射性核素嬗变分析，完成百万千瓦级超临界水冷快中子反应堆堆芯整体概念设计、材料性能研究和传热机理研究：包括超临界水冷快堆的物理和热工耦合概念设计、超临界水冷快堆的增殖和嬗变优化设计、快堆设计的超临界水传热流动和强化传热研究。

当考虑到电磁场作用时，多相流的数值模拟还必须考虑到电磁力的作用。事实上磁约束可控热核聚变反应堆作为未来的干净、安全的新能源，其面对等离子体部件在等离子体不稳定下，承受极大热流密度材料会熔化、蒸发，是影响部件寿命的关键因素。深入研究强电磁场作用下金属流体流动与传热、金属材料熔化与凝固的多物理场耦合相变问题基础研究，是实现热核聚变反应堆安全运行、包层高效能量转换的关键。美国、欧盟和日本均对多物理场作用下的与磁约束热核聚变包层相关的流动、传热和传质作了长期深入的研究。中国作为国际热核聚变

实验堆 (ITER) 的重要参与国之一, 已提出自己的包层设计概念。对包层及第一壁相关的强磁场作用下的流体流动、传热和传质进行深入的研究具有非常重要的实际意义和科学意义, 国内在相关领域已有一定的研究基础。在多相流的模拟方面有着多年的积累和发展, 在金属流体的磁流体动力学 (MHD) 的数值模拟计算方法及软件平台的发展方面有较好的研究基础和积累。相容守恒格式可精确地计算电磁力, 结合在数值传热学及多相流方面的工作基础可以对多场耦合下的多相流动与传热进行精确的数值模拟。同时需要发展不透光金属流体流动三维速度及温度场的测试方法。

6.4.7 CO₂ 地质封存研究中的多相流问题

CO₂ 作为一种温室气体, 对气候的影响近年来逐年增加。全球的工业化、城市化的脚步不断加快, 在提高人类生活质量、社会便捷程度的同时, 也导致了巨额的能源消费, 进而导致以 CO₂ 为主的温室气体排放的急速上升, 引发了一场全球范围内的温室效应危机。我国是世界上煤炭生产和消费的大国, 石油和天然气资源有限, 21 世纪的主要能源仍然是煤炭, 因此, 作为 CO₂ 排放的大国, 面临着来自国际社会和国内发展的双重压力, 需要即刻开展相关重点研究并逐步实施一系列重大战略和重要技术, 以此来减少 CO₂ 排放而又不降低能源服务水平和人民生活水平。

目前, 如何有效缓解温室效应是一个在 21 世纪摆在全人类面前的重大课题。现在, CO₂ 捕集与封存 (CCS) 技术已受到国际学术界和产业界的密切关注。由于其与现有能源系统基础构造的一致性, 受能源资源条件限制较小, 该技术尤其受到工业化国家的广泛关注与密切重视, 美国、欧盟和加拿大等都制定了相应的研究规划, 开展了 CCS 技术的理论、试验、示范及应用研究。

研究表明, CCS 技术是一项极具潜力的减少 CO₂ 排放的前沿技术, 该技术有可能在经济发展与环境保护两个方面实现双赢局面。CCS 技术主要由 3 个环节构成: ①CO₂ 的捕集, 指将 CO₂ 从化石燃料燃烧产生的烟气中分离出来, 并将其压缩至一定压力; ②CO₂ 的运输, 指将分离后的 CO₂ 输送至存储地; ③CO₂ 的封存, 指将运抵存储地的 CO₂ 注入如地下盐水层、废弃油气田、煤矿等, 或者深海海底或海洋水柱或海床以下的地质结构中。目前, 国际社会主要关注的是地质碳捕集和存储。作为 CO₂ 排放的大国, 开展相关 CCS 技术的研究对实现经济与环境的可持续发展具有重要的意义。

近代 CO₂ 的多孔介质/膜分离过程是具有降低能耗前景的 CO₂ 捕集的新方法, 它的研究对于降低 CO₂ 捕集的代价, 使其进入实际工业应用具有重要意义。

其中,多孔介质中的流动过程称为问题的关键,克努森扩散(Knudsen diffusion)、表面扩散、多孔结构等成为关键参数。

CO₂封存技术是CCS技术中的关键问题。CO₂封存技术主要包括地质碳捕获和存储(包括陆地地质结构和海底以下地质结构)、海洋碳捕获和存储、植被埋存等。我国已具备许多CO₂地质封存的地质条件,如松辽平原、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地和四川盆地等。从本质上来说,CO₂的多孔介质/膜分离过程和地质封存过程属于多孔介质多相流问题,研究与理解CO₂在多孔介质结构中的迁移、物理及化学过程,在确保CO₂的高效低能耗捕集,地质封存的安全性、有效性和可接受性,确保公众健康和环境质量,评估存储与捕捉效率,提供早期的封存失效预警,为决策者提供坚实的科学依据等方面具有特别重要的意义。

CO₂的多孔介质/膜分离/捕集过程以及CO₂地质封存等过程涉及对流、浮力流动、扩散、传热、毛细力作用、溶解以及地球化学反应等。然而,由于问题的复杂性、研究条件的苛刻,CO₂在多孔介质中的迁移、物理及化学过程的研究远远不够完善的。因此,对于CO₂在多孔介质中的流动、扩散、换热、相变、捕集、封存等重要问题,主要的研究内容应包括:

1) 数理模型研究

(1) 在CO₂的捕集与封存过程中,多孔介质中包括相变和物性显著变化的流体流动与扩散是基本的问题,这方面的模型尚且有待建立和完善。

(2) CO₂地质封存过程具有很大的时间(几百年、上千年)与空间尺度,完善的数值模型能够有效地预测未来CO₂在地层中的状态。在不同的时间尺度与空间尺度上,CO₂在地层中的迁移与被捕获的机制是不一致的,为此,建立融合不同时间与空间尺度捕获机制的数值模型具有特别重要的意义。

(3) 辨识地层流体与CO₂相发生相间迁移而导致的物性变化的机制与规律,细化模型。

(4) 揭示在不同的温度梯度与压力梯度环境下CO₂(或者非纯净CO₂,如混有H₂S、NO_x等)与地层流体间相互作用的物理与化学机制。

(5) 研究CO₂封存状态、稳定性,深化孔隙结构对CO₂迁移过程的影响机制与复杂渗流机制的认识等。

(6) CO₂的捕集涉及多机理、多参数、复杂几何结构的复杂的物理模型。另外,完善的CO₂地质封存过程模型是一个典型的大规模、多尺度、多场耦合复杂非线性问题。非线性方程的解是不确定的,为此,需要开拓新的计算方法与计算策略,研发快速、稳定、低计算代价的算法。

2) 检测方法

近代 CO_2 的多孔介质/膜分离过程,是具有降低能耗前景的新型方法。其中,多孔介质中的流动过程称为问题的关键。对其中物质的分布、流动状态、克努森扩散、表面扩散、多孔结构、介质的物性、作用条件等定量的检测和规律的发现成为掌握过程机理和特性的关键。

对于上述问题关键参数的测量,具有较大的难度和丰富的内容:在空间尺度上,涉及大区域范围的物质迁移而又细微至多孔介质内部甚至于分子尺度的巨大尺度跨度;在时间尺度上,存在多孔介质内的实时反应直到常年累计效应的时间差;在机理上,存在多种物理、化学的机理的耦合作用。因此,新型的测量方法和理论,如与热物理机理相融合的传感方式和参数重建方法,传感网络,多机理感应,多机理融合传感方法,结合热物理信息和化学组分,电、声、光等的大规模信息集成处理方法等具有巨大的意义和技术发展空间。另外, CO_2 迁移及状态监测技术在确保 CO_2 地质封存的安全性、确保公众健康和环境质量、提供早期的封存失效预警、验证数值模型的可靠性等方面具有特别重要的意义。

目前, CO_2 监测的方法主要可分为两类:深层监测方法与浅层监测方法。然而,由于问题的复杂性,获得高精度的监测资料仍存在巨大的挑战。研究表明,单一的监测方法远远难以满足实际应用的需求,因此,研发融合多种测量机理的测量策略与方法(如层析成像技术的场测量与其他点测量技术的融合)以及相关的融合策略与算法是一个具有广阔发展前景的方法。

6.4.8 多相流与其他科学的相互渗透及交叉

多相流动既是力学系统中的一门独立的基础学科,又是众多应用学科的基础。除了在能源动力、化学工程、过程工程和环境工程中普遍存在外,还与地球物理学科、石油开采与采矿、医学和制药行业、生物芯片乃至自然灾害与公共安全等领域密切相关。学科交叉可大大促进多相流动学科的发展。展望 21 世纪的科技发展趋势,当前两相流研究应当和微重力和微尺度科学、生命科学以及纳米科学结合起来,继续就生物、医药科学中的两相及多相流,材料制备与加工中的多相流热物理,能源高效和可再生转化的微多相流光化学与热化学反应理论,电磁场中的多相流,光声效应等开展研究。

随着生物医学技术的发展,用于成像的造影剂或疾病治疗的各种颗粒和微泡、微滴等在生物系统的流动与运输规律决定着成像的质量和治療的效果,因此,充分考虑到生物系统的复杂性,特别是粒子、血液细胞及其与血管壁之间的相互作用对多相流的影响,将是多相流未来发展的重要方向之一。

参考文献

- [1] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 学科发展战略研究报告 (2006 ~ 2010 年) — 工程热物理与能源利用. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 中国工程热物理学会, 2007 — 2008 工程热物理学科发展报告. 北京: 中国科学技术出版社, 2008.
- [3] 林宗虎, 郭烈锦, 陈听宽, 等. 能源动力中多相流热物理基础理论与技术研究. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [4] 郭烈锦. 两相与多相流动力学. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [5] Tryggvason G, Scardovelli R, Zaleski S. Direct Numerical Simulations of Gas-Liquid Multiphase Flows. New York: Cambridge University Press, 2011.
- [6] Clayton T C, John D S, Sommerfeld M, et al. Multiphase Flows with Droplets and Particles. 2nd Edition. New York: CRC Press, 2011.
- [7] Zapryanov Z, Tabakova S. Dynamics of Bubbles, Drops and Rigid Particles. Belin: Springer, 2011.
- [8] Ishii M, Hibiki T. Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow. 2nd Edition. Berlin: Springer, 2010.
- [9] Brennen C E. Fundamentals of Multiphase Flow. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [10] Balachandar S. A scaling analysis for point-particle approaches to turbulent multiphase flows. International Journal of Multiphase Flow, 2009, 35(9): 801 — 810.
- [11] 陶文铨. 换热与流动问题的多尺度数值模拟: 方法与应用. 北京: 科学出版社, 2009.
- [12] Chen S L, Lin C Z, Guo L J, et al. Drop deformation and breakup with diffuse interface method. The 6th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion, Xi'an, 2009.
- [13] Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension. Journal of Computational Physics, 1992, 100: 335 — 354.
- [14] Liu X D, Fedkiw R P, Kang M. A boundary condition capturing method for poisson's equation on irregular domains. J. Comput. Phys, 2000, 160: 151 — 178.
- [15] Lafaurie B, Nardone C, Scardovelli R, et al. Modelling merging and fragmentation in multiphase flows with SURFER. Journal of Computational Physics, 1994, 113: 134 — 147.
- [16] Francois M M, Cummins S J, Dendy E D, et al. A balanced-force algorithm for continuous and sharp interfacial surface tension models within a volume tracking framework. Journal of Computational Physics, 2006, 213: 141 — 173.
- [17] Delhay J M. Jump conditions and entropy sources in two-phase systems. local instant formulation. International Journal of Multiphase Flow, 1974, 1: 395 — 409.

- [18] Ni M J. Consistent projection methods for variable density incompressible Navier-Stokes equations with continuous surface forces on a rectangular collocated mesh. *Journal of Computational Physics*, 2009, 228: 6938 — 6956.
- [19] Yan J, Luo K, Fan J R, et al. Direct numerical simulation of particle dispersion in a turbulent jet considering inter-particle collisions. *International Journal of Multiphase Flow*, 2008, 34(8): 723 — 733.
- [20] 林建忠, 等. 超常颗粒多相流体动力学——圆柱状颗粒两相流. 北京: 科学出版社, 2008.
- [21] Wang Z L, Fan J R, Luo K. Combined multi-direct forcing and immersed boundary method for simulating flows with moving particles. *International Journal of Multiphase Flow*, 2008, 34(3): 283 — 302.
- [22] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论. 北京: 科学出版社, 2009.
- [23] 李静海, 欧阳洁, 高士秋, 等. 颗粒流体复杂系统的多尺度模拟. 北京: 科学出版社, 2005.
- [24] Wang G D, Cheng P, Bergles A E. Effects of inlet/outlet configurations on flow boiling instability in parallel microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(9-10): 2267 — 2281.
- [25] Xu J L, Liu G H, Zhang W, et al. Seed bubbles stabilize flow and heat transfer in parallel microchannels. *International Journal of Multiphase Flow*, 2009, 35: 773 — 790.
- [26] Liu G H, Xu J L, Yang Y P. Seed bubbles trigger boiling heat transfer in silicon microchannels. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2010, 8(3): 341 — 359.
- [27] Zhang W, Liu G H, Xu J L, et al. Effect of channel surface wettability and temperature gradients on the boiling flow pattern in a single microchannel. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19: 055012.
- [28] Wang G D, Cheng P. Subcooled flow boiling and microbubble emission boiling phenomena in a partially heated microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(1-2), 79 — 91.
- [29] Xu J L, Zhang W. Effect of pulse heating parameters on the microscale bubble dynamics at a microheater surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51: 389 — 396.
- [30] Zhao J F, Li J, Yan N, et al. Bubble behavior and heat transfer in quasi-steady pool boiling in microgravity. *Microgravity Science and Technology*, 2009, 21(1): 175 — 183.
- [31] Zhao J F, Wan S X, Liu G, et al. Subcooling pool boiling on thin wire in microgravity. *Acta Astronautica*, 2009, 64(2-3): 188 — 194.
- [32] Zhao J F, Liu G, Wan S X, et al. Bubble dynamics in nucleate pool boiling on thin wires in microgravity. *Microgravity-Science and Technology*, 2008, 20(2): 81 — 89.

- [33] Yang W Q, York T A. New AC-based capacitance tomography system. IEE Proceeding of Science Measurement and Technology, 1999, 146(1): 47—53.
- [34] 李海青, 黄志尧. 特种测量技术及应用. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.
- [35] Liu S, Wang H, Fan J, et al. A new image reconstruction method for tomographic investigation of fluidized beds. AIChE Journal, 2002, 48(8): 1631—1638.
- [36] Warsito W, Marashdeh Q, Fan L S. Real time volumetric imaging of multiphase flows using electrical capacitance volume-tomography (ECVT), MFI12. The 5th World Congress on Industrial Process Tomography, Norway, 2007.
- [37] Liu S, Chen Q, Wang H G, et al. Electrical capacitance tomography for gas-solids flow measurement for circulating fluidized beds. Flow Measurement and Instrumentation, 2005, 16(2-3): 135—144.
- [38] Wang H, Yang W Q, Dyakowski T, et al. Study of bubbling and slugging fluidized beds by simulation and ECT. AIChE Journal, 2006, 52(9): 3078—3087.
- [39] Liu S, Chen Q, Xiong X, et al. Preliminary study on ECT imaging of flames in porous media. Measurement Science and Technology, 2008, 19(9): No. 094017.
- [40] Chen X B, Shen S H, Guo L J, et al. Semiconductor-based Photocatalytic Hydrogen Generation. Chemical Reviews, 2010, 110(11): 6503—6570.
- [41] Jing D W, Guo L J, Zhao L, et al. Efficient solar hydrogen production by photocatalytic water splitting: From fundamental study to pilot demonstration. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(13): 7087—7097.
- [42] Liu M C, Wang L Z, Lu G Q. Twins in $C_{d1-x}Zn_xS$ solid solution: Highly efficient photocatalyst for hydrogen generation from water. Energy & Environmental Science, 2011, 4(4): 1372—1378.
- [43] Guo L J, Zhao L, Jing D W, et al. Solar hydrogen production and its development in China. Energy, 2009, 34(9): 1073—1090.
- [44] Chen J W, Lu Y J, Guo L J, et al. Hydrogen production by biomass gasification in supercritical water using concentrated solar energy: System development and proof of concept. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(13): 7134—7141.
- [45] Jin H, Lu Y J, Guo L J, et al. Hydrogen production by partial oxidative gasification of biomass and its model compounds in supercritical water. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(7): 3001—3010.

第7章 可再生能源

7.1 学科内涵、学术意义与应用背景

我国正处于经济快速发展且社会向低碳转型时期,能源需求持续增长,能源和环境对可持续发展的约束越来越严重,因而势必发展清洁能源技术、加速本地化清洁能源特别是可再生能源开发。可再生能源主要是指太阳能、风能、生物质能、地热、海洋能等资源量丰富,且可循环往复使用的一类能源资源^[1]。可再生能源是环境代价小、发展前景明确、争议较少的能源。可再生能源转化利用具有涉及领域广、研究对象复杂多变、交叉学科门类多、学科集成度高等特点。在可再生能源工程领域中,工程热物理学学科主要研究可再生能源利用过程中能量和物质转化、传递原理及规律等相关热物理问题。可再生能源利用形式多样,涉及工程热物理各个分支学科及外延环境资源学科,具有鲜明的多学科交叉与耦合的特点。工程热物理学学科相关分支学科的发展将为可再生能源利用技术的研究和发展提供理论基础和技术保障,而可再生能源利用的研究又不断为工程热物理学学科提出新的研究方向和发展目标,促进工程热物理学学科的发展。2006年开始实施的《可再生能源法》以及我国为实现节能减排目标而实施的相关政策法规将大大推进中国在可再生能源的研究、开发和应用。可再生能源的开发利用已成为我国能源工业发展的重要战略目标,必须高度重视可再生能源利用技术的基础研究,包括资源预测与挖掘、能量转化与物质传递、环境特征等方面的研究工作。

7.1.1 学科内涵

1. 太阳能

太阳能是太阳内部连续不断的核聚变反应过程产生的能量。尽管太阳辐射到地球大气层的能量仅为其总辐射能量(约为 $3.75 \times 10^{26} \text{ W}$) 的二十二亿分之一,但已高达 173000TW,也就是说太阳每秒钟照射到地球上的能量就相当于 500 万 t 煤。太阳能资源总量大,分布广泛,使用清洁,不存在资源枯竭问题。进入 21 世纪以来,太阳能利用有令人振奋的新进展,太阳能热水器、太阳能电池等产品

年产量一直保持 30% 以上的增长速率，它们被称为“世界增长最快的能源”。

太阳能转换利用是利用太阳辐射实现采暖、采光、热水供应、发电、水质净化以及空调制冷等能量转换过程，以满足人们生活、工业应用及国防科技需求的专门研究领域，主要包括太阳能光热转换、光电转换和光化学转换等^[2]。太阳能光热利用指将太阳能转换为热能加以利用，如供应热水、热力发电、驱动动力装置、驱动制冷循环、海水淡化、采暖和强化自然通风等过程；光电利用指通过太阳能电池的光伏效应将太阳辐射直接转化为电能加以利用的过程；光化学利用则包括植物光合作用、太阳能光解水制氢、热解水制氢以及天然气重整等转换过程。涉及的理论基础包括工程热物理学学科的几乎所有分支学科，关系最密切的是工程热力学、传热质质学和热物性学。要构成有实用价值的太阳能利用系统，还需要进行热力系统动力学研究。太阳能转换利用还和化学、材料科学、光学工程、建筑科学和生物科学等学科有着密切联系，是一门综合性强、学科交叉特色鲜明的研究分支。在工程热物理学学科范畴内，应着重研究与各种太阳能转换利用过程相关的能量利用系统动态特性以及与能量转换及输运过程有关的热物理问题等。太阳能资源开发利用的关键，是解决高效收集和转化过程中涉及的能量利用系统形式、能量蓄存和调节、材料研究和选择等问题。

2. 生物质能

所有含有内在化学能的非化石有机生物物质统称为生物质，主要包括各种速生的能源林、薪炭林、经济林、用材林、灌木林、木材及森林与园林工业废弃物，农业生产和加工剩余物，水生植物，油料植物与作物，甜高粱等能源作物，城市和工业有机废弃物，动物粪便等。生物质能本质上来来自于太阳能，是可再生、天然可用、富含能量、污染物质（含硫、氮量较小）少、完全足以替代化石燃料的含碳能源。据估计，地球上植物每年通过光合作用固定的碳达 $2 \times 10^{11} \text{ t}$ ，含能量达 $3 \times 10^{18} \text{ kJ}$ ，可开发的能源约相当于全世界每年耗能量的 10 倍。目前，生物质能源占可再生能源消费总量的 35% 以上，占一次能源消耗的 15% 左右。中国作为世界上最大农业国，具有丰富生物质能资源，现阶段主要来源有农林废弃物、粮食加工废弃物、木材加工废弃物和城市生活垃圾等。我国每年可利用的生物质资源约 6.5 亿 t 标煤，预计到 2050 年将增加到 9 亿 t 标煤以上。生物质能开发利用的环境效应显著，其中有机废弃物转化为燃料可直接显著减少环境污染。可以预计，未来二三十年内生物质能源最有可能成为 21 世纪主要的可再生能源之一。

生物质转化成能量利用有多种途径或方式，当前主要采用两种技术途径：热化学技术和生物化学技术，此外机械提取（包括酯化）也是其能量转化利用的

一种形式^[3]。热化学技术包括燃烧、气化和液化。生物化学技术包括乙醇发酵、沼气发酵、微生物制氢、生物柴油酶催化技术。通过以上方式,生物质能被转化成热能或动力、燃料和化学品。

生物质能利用的研究范围主要包括:作为一次能源的高效清洁燃烧技术;转换为二次能源的生物质气化和液化技术、生物质催化液化和超临界液化技术、微生物或酶转化技术及生物质燃料改性技术等。上述技术涉及工程热物理与能源利用、物理化学、化学工程及工业化学、微生物学、植物学与农业种业学、电工科学、信息科学等多个学科。工程热物理与能源利用学科主要解决生物质能直接利用或能源转换过程中能量转换的基本原理以及热质传递规律等关键性热物理问题,在生物质能利用领域起着非常重要的引领作用。与之密切联系的学科方向有:工程热力学、传热传质学、燃烧学、热物性与热物理测试技术等。当前生物质能转化利用的技术水平远非理想,因此亟待基础研究的加强。

3. 风能

风能取之不尽,用之不竭,地球上的风能资源每年约为 200 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 利用 1% 就可满足人类对能源的需要。风能利用的最大难题是风速与风向的随机性和不连续性,即风速、风向会随着时间和地点变化,难以保证风力发电机组功率稳定输出。风能利用的研究大体可分为:①大气边界层中风特性的研究;②风力机理论、新型叶片外形与材料以及风力发电系统新型控制方法^[4];③风能利用的方式以及多能互补综合利用系统的研究。

现代风力机系统包括自然风、叶片、机械系统、控制系统和电力系统等相互作用的子系统,涉及工程热物理与能源利用、大气科学、机械科学、电工科学、材料科学、自动化科学等多个学科。工程热物理与能源利用学科主要研究复杂地形和极端气候条件下的大气边界层风特性、非定常空气动力学特性、大型长叶片的气动弹性稳定性^[5]、多能互补综合利用系统和新型风能转换系统等问题,对于海上风能利用,还涉及波浪、潮汐及风作用下的刚柔耦合结构多体动力学等问题。密切相关的分支学科有工程热力学、流体力学、热物性与热物理测试技术等。

4. 地热能

地热能的利用可分为地热发电和直接利用两大类。地热能是来自地球深处的可再生热能,起源于地球的熔融岩浆和放射性物质的衰变,多数分布在构造板块边缘一带,该区域也是火山和地震多发区。如果热量与地热流体提取的速度不超过补给的速度,地热能便是可再生的。地热能在世界很多地区应用相当广泛,每

年从地球内部传到地面的热能相当于 $100\text{PW} \cdot \text{h}$ 。虽然在技术、经济上有开发潜力的地热能分布相对比较分散,但地热能的能流密度相对较高,对解决一些地区甚至国家的实际用能问题,可发挥重要作用。

根据地热流体温度的高低,地热资源可分为高温 ($>150^{\circ}\text{C}$)、中温 ($90 \sim 150^{\circ}\text{C}$) 和低温 ($<90^{\circ}\text{C}$) 3 种。高温地热能主要用于发电,中温地热能可用于发电、制冷、印染、干燥等,低温地热能一般可直接利用 (供热、温室、旅游和疗养等)^[6]。与地热能利用相关的工程热物理学的基础科学问题包括:地热热储资源的评价与预测、可持续开发与利用模式中的热物理问题;深部岩层内、中浅岩土层多孔介质内地热流体的传热传质学问题;地热能的高效综合利用系统和优化能量转换原理及性能。

5. 海洋能

海洋能指依附在海水中的可再生能源,海洋通过各种物理过程接收、储存和散发能量,这些能量以潮汐、潮流、波浪、温度差、盐度梯度、海流等形式存在于海洋之中^[7]。潮汐与潮流能来源于月球、太阳引力,其他海洋能均来源于太阳辐射,海洋面积占地球总面积的 71%,太阳到达地球的能量大部分落在海洋上空和海水中,部分转化为各种形式的海洋能。因而海洋能总储量巨大,据联合国教科文组织出版的《海洋能开发》认为,全球各种海洋能的理论储量约为 $7.66 \times 10^{10}\text{kW}$ 。

海水温差能是热能,低纬度的海面水温较高,与深层冷水存在温度差,因而储存着温差热能,能量大小与温差和水量成正比;潮汐能、潮流能、海流能、波浪能都是机械能,潮汐能是地球旋转所产生的能量通过太阳和月亮的引力作用而传递给海洋,并由长周期波储存的能量,潮汐的能量与潮差大小和潮量成正比;潮流、海流的能量与流速平方和通流量成正比;波浪能是在风的作用下产生,并以位能和动能的形式由短周期波储存的机械能,与波高的平方和波动水域面积成正比;河口水域的海水盐度差能是化学能,入海径流的淡水与海洋盐水间有盐度差,若隔以半透膜,淡水向海水一侧渗透可产生渗透压力,其能量与压力差和渗透流量成正比。

各种能量涉及的物理过程、开发利用方法和程度等方面均存在很大差异。潮汐能、潮流能、波浪能等利用通过机械装置 (潮汐能水轮发电机组、潮流能水轮机、波浪振荡水柱装置等) 转换为机械能,然后转化为电能,可以为近岸、偏远海岛供应电能、淡水,离岸长期工作的海洋监测仪器供电等;温差能利用是借助低沸点的二氧化硫、氨或氟利昂作为工作介质,使表层海水中的热能向深层冷水中转移,从而做功发电。盐差能是指利用半渗透膜在盐水和淡水交接处实现,利

用渗透压就可以直接由水轮发电机发电。

上述技术涉及工程热物理与能源利用、流体力学、海洋工程、机械工程、控制技术等多个学科。与海洋能利用相关的工程热物理学科基础科学问题包括:海洋能能量高效利用转换装置及原理;潮流能、潮汐能等水轮机理论、叶片流体动力学特性及新型叶片外形与叶片族技术;潮流流体力学与海洋能资源利用;温差能转换传热传质技术等关键性问题。与之密切相关的学科方向有流体力学、流体机械、工程热力学、传热传质学等。

7.1.2 前沿背景与动机的演变

随着气候异常和针对常规化石能源的地缘纷争问题日益突出,近年来各国对于化石能源的替代和可再生能源的规模化应用日益重视。人们对可再生能源科技的研究已有一定程度的积累,对其优缺点的认识更加深刻,对解决其规模化应用的技术途径和科学问题亦有进一步的认识。各国制定的技术路线图正显示出其现实的可行性,相关激励政策的效果正日益体现。可再生能源的应用正日益受到政府重视和普通民众接受。各国已认识到新兴能源产业在未来国际经济竞争的重要性,正大力发展新兴能源产业。福岛核电站事故的发生使各国政府和人民对核能利用更加审慎,更愿意为可再生能源的利用付出经济代价。

信息科学与技术及分布式能源的发展使智能电网更为可行,为解决可再生能源的能量稀薄、供给不稳定等重要问题提供可靠手段,可再生能源发电在发达国家(如德国)已占到总电力供给的30%,并具有更大的发展潜力。

机械、电子、化学、生物、材料等多学科交叉、互补、渗透已成为可再生能源科学与技术发展的重要特点。多种可再生能源互补,可再生能源与化石能源互补,蓄能等以前不够重视的科学与技术成为研究热点和技术关键。

7.2 国内外研究现状与发展趋势

7.2.1 太阳能

当今世界各国都在大力开发利用太阳能资源。欧洲、美国、澳大利亚、以色列和日本等国家,纷纷加大投入积极探索实现太阳能规模化利用的有效途径。德国等欧盟国家更是把太阳能、风能等可再生能源作为替代化石燃料的主要替代能源大力扶植和发展。太阳能转换利用研究已经成为当前国际上技术科学中十分活跃的一个领域,每年都有国际学术会议频繁举行,最具代表性的有世界太阳能大会和世界可再生能源大会,有关专题分组、分地区学术讨论也非常之多。

世界各国,特别是欧美等发达国家纷纷制定政策规划推进太阳能利用。较为著名的有欧盟的20%规划,到2020年可再生能源要占到总能耗的20%,其中太阳能热发电将达15GW,发电量43TW·h,2010~2020年的年增长率为31.1%。太阳能热利用12Mtoe,2010~2020年的年增长率为23.1%^[8]。美国能源部于2008年4月制定了新的五年计划(2008~2012年),代表了美国政府在太阳能利用方面的研究、开发、示范和推进的最新努力^[9]。特别是最近欧盟提出在北非沙漠地区建设太阳能热发电站,通过电网从海底送往欧洲大陆,项目规划预算达到2000亿欧元。

太阳能直接转化利用是全球可再生能源发展战略的重要组成部分,特别是构成未来分布式可再生能源网的重要环节,太阳能可以在公共安全、电力供应、建筑节能和规模化热水供应等方面发挥积极的作用。目前,主要研究方向可分为两大类:一是面向太阳能规模化利用的关键技术;二是探索太阳能利用新方法、新材料,发现和解决能量转化过程中的新现象、新问题,特别是开展基于太阳能转化利用过程的热力学优化、能量转换过程的高效化、能量利用装置的经济化等问题^[10]。

1. 太阳能常规热利用

利用太阳能集热器对水、空气或其他流体加热是目前应用最广泛、相对最成熟的太阳能利用技术^[11]。但在大面积、高温太阳能加热系统中存在气液相变造成汽阻、管道阻力分配不均匀等问题。此外,经济性和蓄能等问题也是实现太阳能规模化应用的关键。约旦、马来西亚等地区利用当地丰富的太阳能资源和特殊的蜂窝透明材料对输油管道进行加热以减少稠油的黏性,我国西藏等地区推广应用的太阳灶等具有鲜明的特色。常规集热器的低成本化、模块化、高效化是重要发展方向。常规太阳能集热还在农业种植、农产品干燥与处理、畜牧鱼养殖,工业过程处理等场合有巨大的应用潜力。

太阳能热水器技术在我国应用最广泛、产业化发展最迅速,是我国可再生能源领域中产业化发展最成功的范例。我国是世界上最大的太阳能热水器生产国和使用国,2009年生产太阳能热水器4200万m²,已累计安装1.45亿m²。产量和保有量分别占到世界的80%和76%。虽使用量最大,但普及率与以色列、希腊、塞浦路斯等国家仍存在较大差距,还有很大的发展空间。除对太阳能集热器和被动式太阳房进行了较多的传热分析外,有关太阳能转换利用材料、短期或季节性蓄能机理、系统分析以及生产工艺方面开展的研究与国际先进水平相比,尚有差距。

2. 太阳能利用与建筑一体化

各类建筑均是能耗大户，同时也是太阳能利用装置最好的载体。通过合理设计、充分利用建筑物维护结构和选择适合的能源转换形式，可实现利用太阳能进行采暖、采光、热水供应、空调制冷、强化自然通风、部分电力供应以及水质净化等功能，极大地降低建筑物使用能耗。早期的被动式太阳房采暖、现代的各种主动式太阳能技术和设备，以及未来的建筑中太阳能开发利用，正体现这样的发展趋势。

3. 太阳能发电

实现太阳能发电的技术途径如图 7.1 所示，主要包括太阳能光伏发电和热发电两种技术^[12]，其中光伏发电系统以其技术相对成熟、安装简单、维护廉价、适应性强等优势而获得规模化应用。

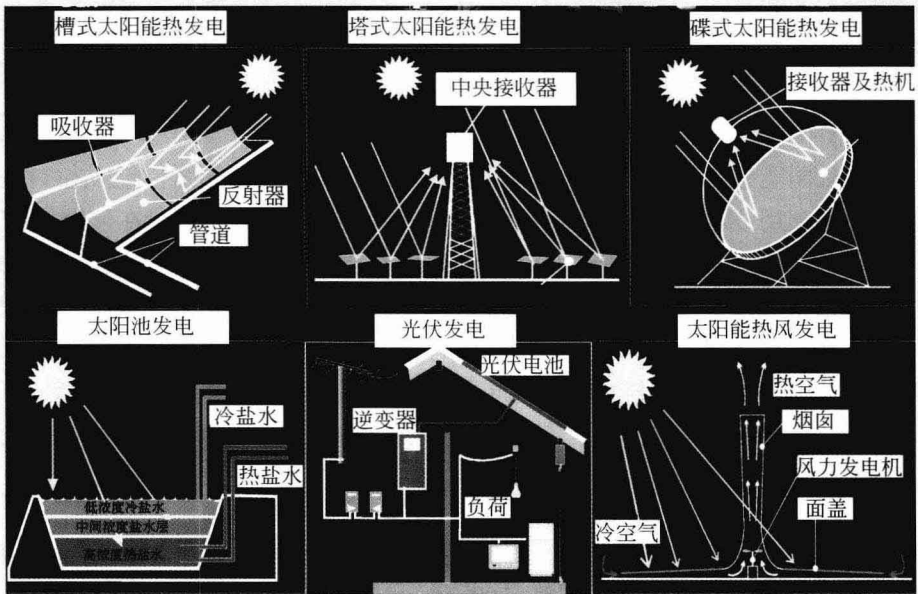


图 7.1 太阳能发电的技术途径^[12]

2000 ~ 2010 年全球光伏系统年装机增长率达到 45%。欧洲光伏工业协会 (European Photovoltaic Industry Association, EPIA) 统计，2010 年全球新增光伏装机 16.6GW，全球光伏累计安装 39.5GW。该协会预计，2020 年全球光伏安装总

量将达到 350GW。在发展高性能太阳能电池、聚焦光伏电池、光伏/光热综合利用技术中,相关传热和热力学是目前研究热点。

聚焦式太阳能集热技术既可用于发电,也可用来驱动热化学反应和光催化、光电效应等,由于能够以低成本获得较高的能量转换效率,已受到越来越多的重视,是太阳能利用领域的重要研究方向^[13]。

太阳能热发电主要采用聚焦集热技术,产生驱动热机需要的高温液体、气体或蒸汽发电。根据聚焦技术不同,有槽式、塔式、碟式、菲涅尔式发电技术(见图 7.1)。发达国家在槽式发电技术方面已有多年商业运行经验,在塔式发电技术方面已实现商业运行。太阳能热发电具有高效、建设及发电成本低、对电网冲击小等优点。槽式和塔式太阳能热发电热-功转换部分与常规火力发电机组相同,有成熟的技术可以利用,因此特别适宜于大规模化使用。碟式太阳能热发电热-功转换采用斯特林机,可直接利用高品位聚光太阳能(斯特林机工作温度可达 700~800℃)做功,发电效率较高,发电规模灵活,但目前发电系统尚未进入规模化生产阶段。目前最大的太阳能热力发电站在美国加州南部运行,太阳能热力发电成本约是光伏发电的 1/2。国际上已签订购电协议的太阳能热发电站已经达到 3200MW,已投入电网运行达 500MW,在建设中的达到 1200MW。我国第一座 50MW 槽式太阳能热发电商业电站于 2010 年启动招标,并将很快启动建设。以色列和美国正在考虑建设单塔装机容量为 20MW、基于分布式发电的 100~200MW 电厂。我国的 1MWe 太阳能塔式电站实验装置也计划于 2010 年年底建成。我国在中高温太阳能集热器、太阳能聚能技术、太阳能热发电方面已有一定研究基础,但与国际先进水平存在一定差距。“十一五”863 计划项目中我国已经布局研究高效的耐高温真空吸热管,初步取得成功,下一步需要长时间运行测试和小规模中试。我国发展太阳能热动力发电技术的主要困难在于初始投资大,发电成本高,核心技术尚待突破等。目前亟待解决的问题主要包括:高效可靠的聚焦集热技术,热量的吸收、传递及储存技术,热-功转换中的能量转换及新型传递规律,与太阳能利用过程匹配的新型热动力循环及动力机械。

碟式聚光太阳能热发电系统投资省、建设周期短、容量可大可小,可以独立运行用于分散式供电,也可以并网运行,不仅适合发达国家,更适合发展中国家使用。典型的碟式太阳能热发电示范系统发电功率为 7.5~25kW。我国西部地区尤其是青藏高原适宜建立碟式太阳能热发电站。斯特林发动机是需要攻克的难关。

基于烟囱效应的太阳能集热和风力透平为核心的太阳能热风发电已在西班牙等国家运行示范,这种系统虽然效率很低,但是可以和农业温室利用结合,显示

出良好的应用前景。目前,澳大利亚、南非等国都在兴建新的太阳能热风发电站。此外还可以利用太阳池盐水浓度差进行蓄能发电,该工作在以色列等国家已有研究和示范。

4. 太阳能制氢

从太阳能等间歇性可再生能源中获得能源储备,最有可能的途径就是制氢,将太阳能转换为燃料^[14,15]。如图 7.2 所示,实现太阳能-氢能转换途径有太阳能光催化制氢、太阳能电解制氢和太阳能热分解制氢等。光催化制氢领域重点在于提高太阳光谱全波段能源利用率,特别是拓展可见光范围相应光催化剂的开发应用,提高能垒,提高太阳能利用率等。太阳能电解水制氢主要通过太阳能发电以电解水制氢。电解水制氢相对比较成熟,与太阳能光电转换环节密切相关,关键是降低太阳能发电成本以及充分利用海水等资源。太阳能热分解制氢则主要包括太阳能热解水、生物质和化石燃料制氢等,通常需要与聚焦式高温太阳能集热装置结合,产生高温通过化学循环反应分解水、生物质以及化石燃料等制氢。由于技术工艺反应温度等要求较严格,目前太阳能热化学分解水制氢尚处于研究和示范阶段。此外,基于太阳能综合利用的热发电、化学能与光热利用结合的复合能量转换系统也有研究。

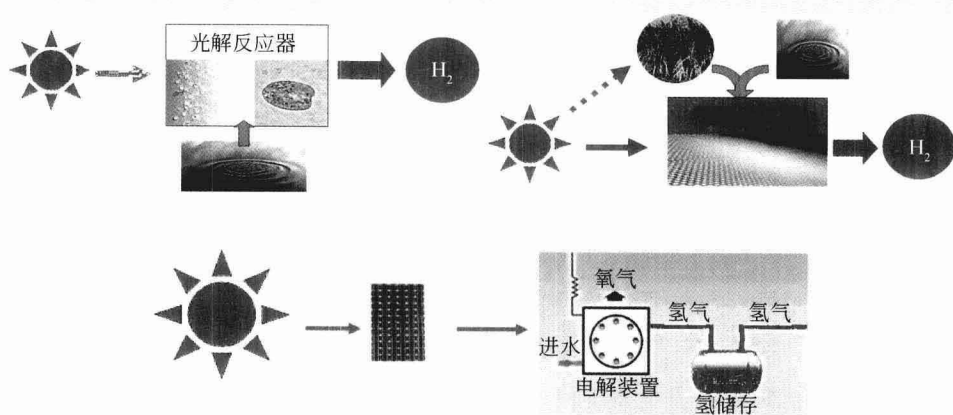


图 7.2 太阳能制氢的途径

5. 太阳能空调制冷

图 7.3 示意了太阳能与燃气结合的太阳能空调制冷系统。太阳能空调制冷最大特点是与季节的匹配性好,夏季太阳越好,天气越热,太阳能空调系统制冷量

也越大。太阳能制冷技术包括主动制冷和被动制冷两种方式。主动式太阳能制冷通过太阳能来驱动能量转换装置实现制冷,包括太阳能光伏系统驱动的蒸气压缩制冷、太阳能吸收式制冷、太阳能蒸气喷射式制冷、太阳能固体吸附式制冷、太阳能干燥冷却系统等^[16~18]。被动式制冷不需要能量转换装置,利用自然方式实现制冷,包括夜间自然通风屋顶池式蒸发冷却以及辐射冷却等。目前主要发展主动式太阳能制冷。研究工作主要集中在:①常规太阳能集热器低成本化和高效化;②集热效率高、性能可靠的中高温太阳能集热器,这种集热器可以产生 150°C 以上的蒸气,从而直接驱动双效吸收式制冷机;③换热器的传热传质强化和新的利用低温位热能的制冷(循环)流程。

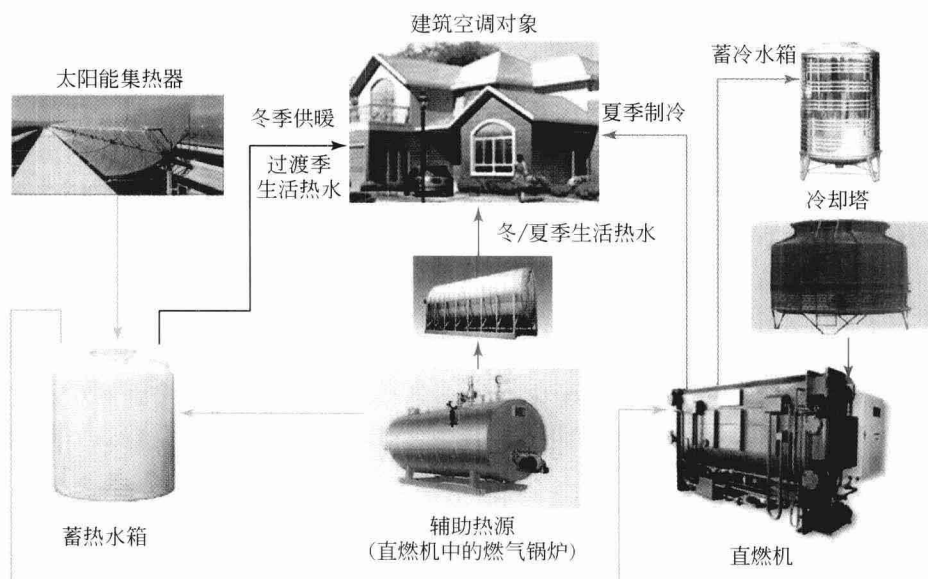


图 7.3 太阳能复合空调系统

6. 太阳能海水淡化

利用太阳能等可再生能源进行海水或苦咸水淡化是实现淡水资源可持续供应的重要途径。太阳能海水淡化领域研究在中东、北非以及欧洲地中海地区研究非常活跃,美国、日本等国家也投入大量的人力物力进行淡化技术的开发示范等。以色列 IDE 技术公司的太阳能海水淡化系统将太阳能热发电和海水淡化相结合,实现了太阳能的多目标利用^[19]。

太阳能海水淡化技术领域的基础研究集中在:①完全靠太阳能和环境条件自

然变化驱动的被动式淡化水方法,如传统的太阳能蒸馏池,多效太阳能蒸馏器等;②主动式淡化水方法,制备淡水需要少量的动力消耗,同时还要求配备风机、水泵等额外装置,强化传热传质效果,提高系统性能;③实现能源梯级利用,上述技术与其他相关技术综合应用的复合系统等,如和太阳能温室相结合、与压汽蒸馏以及闪蒸法等工艺相结合等。主动式海水淡化方法由于改善了淡化装置的传热传质效果,蒸发温度和冷凝温度可以分开调控,备受重视。海水淡化过程中的能量、水分、盐分回收,传热传质过程强化,部件中的结垢特性,能源利用效率和产水率提高等是研究的重点,太阳能转换利用环节主要是中低温位的太阳能集热器,与蒸馏、闪蒸、压汽蒸馏等工艺以及各种传热传质过程相关的设备结合。

近年来我国的太阳能光伏发电技术、光伏产业得到长足发展,过去10年太阳能电池和组件生产年均增长率为25%,电池和组件性能不断提高,但是性能指标和生产工艺都与国际上存在一定差距。有关光伏效应热力学、半导体热力学以及光伏系统极端温度条件下的工作性能等研究开展不多。与国外发达国家将比,我国的太阳能热发电技术,无论从技术的成熟度还是规模化方面都还存在较大差距。

太阳能建筑,特别是太阳能利用与建筑一体化技术在我国受到高度重视并取得长足发展。在传统被动式太阳房热性能分析基础之上,从建筑物复合能量利用系统角度开展基于提高太阳能利用分数与充分利用建筑物结构为目的的太阳能采暖、热水供应、采光、通风、空调以及发电等系统分析,是建筑节能和生态住宅技术中的重要方面。太阳能聚光与光导管结合的太阳能照明技术是建筑节能的重要发展方向。

太阳能-氢能转换在我国研究较早,特别是与化工等领域结合,随着高性能燃料电池技术的快速发展,制氢、储氢和利用氢能成为我国许多研究机构的热门研究课题,相应太阳能电解制氢、光催化制氢等研究也得到发展。该领域的差距主要在连续稳定制氢反应体系的构建原则、新型微多相反应体系的创新及反应动力学,多相连续制氢中催化剂及其他助剂的活性形成机理与测量、表征等研究方面。太阳能全波段利用以及高效、低成本制氢规模化理论有待攻关突破。

我国从20世纪70年代开始对太阳能制冷技术进行研究,主要是进行间歇式氨-水吸收式、连续式制冷和溴化锂吸收式、活性炭-甲醇工质对固体吸附式制冷系统等的深入研究,太阳能低温干燥储粮技术、太阳能住宅用空调制冷/供热系统研究也有涉足。太阳能制冷研究的另一个方向是开发研究中高温聚焦式太阳能集热器,和现有制冷机组进行有机组合,特别是以太阳能为主,构成具有经济性

的多能源复合能量系统。得益于我国在太阳能集热器领域的制造优势和在吸附/吸收式制冷领域的技术优势,太阳能空调制冷工作某些方面走在了世界的前列,合适的复合能量利用系统、能量传递过程的传热传质强化,热力学优化分析等工作有待进一步深入开展。

太阳能海水淡化领域总体上缺乏系统性和规模效应,主要技术和工艺方面研究不够深入,特别是在一些代表性装置的性能指标方面与国际水平有较大差距。基于太阳能热能转换实现海水淡化过程的制淡工艺仍然是太阳能海水淡化方法的研究重点,能量回收、盐分回收和水分回收等许多环节有待进一步优化,制造工艺等亟须进一步提高。另外,海水淡化在有效解决缺水问题的同时,对周围环境也产生了一些不利影响。在海水淡化可能导致的环境影响中,热浓盐水对排放地周围海洋环境的污染是一个有待解决的重要问题,已经引起海洋环境专家和渔业界的关注。目前,国际上海水淡化厂的浓盐水排放基本上都是冲稀后直接排海,但海洋对排放物的消纳能力并不是无限的,高浓度的热浓盐水和淡化过程中引入的化学物质可能对排放口周围的海洋生物造成伤害。另外,热浓盐水可能会快速沉入海底并危害敏感的深海环境,对于一些封闭或半封闭海域(如我国渤海等),特别是当淡化规模很大时,热浓盐水排放问题需要研究。

7.2.2 生物质能

当今石油天然气等不可再生的化石能源面临枯竭,煤炭深度开采与加工带来的环境与安全隐患突出,可再生清洁的生物质能源已成为国际能源战略的重要着眼点,各国极为重视生物质能的研发和应用。目前,全球生物质能源占能源消费总量的平均比重约为15%,为第四大能源^[20]。美国各种形式的生物质能源占可再生能源总量的45%,占全国消耗能源的4%,有350多座生物质发电站,主要分布在纸浆、纸产品加工厂和其他林产品加工厂。据估计,2010年生物质发电已达到13000MW装机容量。荷兰可再生能源绝大部分为生物质能,占可再生能源量的94%左右。丹麦主要利用秸秆发电,使可再生能源占全国能源消费总量的24%。芬兰和瑞典的木质系生物质能已分别占本国总能耗的16%和19%。2006年我国乙醇总产量约350万t,其中燃料乙醇产量达到160万t,位居世界第三,而2008年燃料乙醇产量接近190万t;2008年农村沼气与大中型养殖场沼气年利用量约120亿m³,生物质能发电接近200万kW。生物质能的研究开发已成为世界热门课题之一,得到各国政府和科学家的重视。

图7.4表示了生物质能综合利用的集成技术方案。

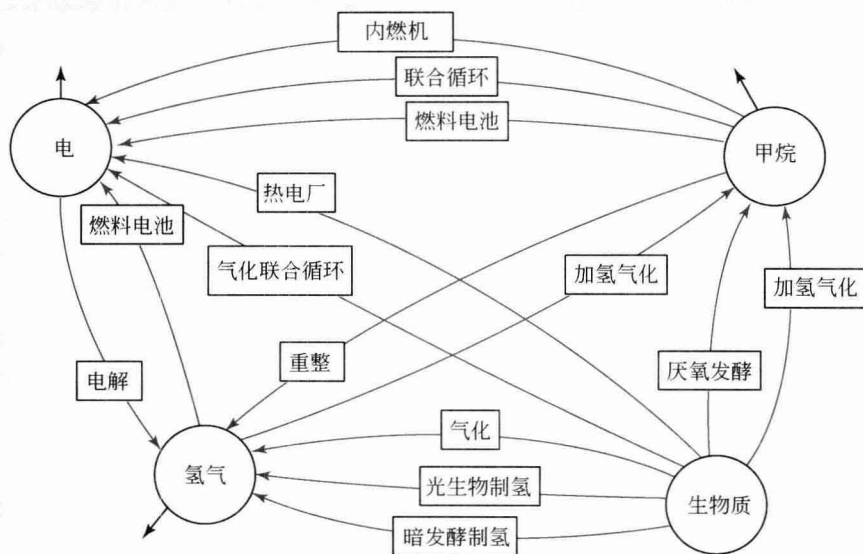


图 7.4 生物质能综合利用示意图

1. 生物质热化学转化技术

1) 生物质直接燃烧技术

生物质在空气中燃烧是人类利用生物质能历史最悠久的、应用范围最广的一种基本能量转化利用方式，主要技术有炉灶燃烧、锅炉燃烧、致密成型和垃圾焚烧技术，最终产物为热或者电。目前，生物质发电已占主要发达国家可再生能源发电量的 70%，美国的生物质直接燃烧发电装机容量已达 10.5GW，70% 为生物质-煤混合燃烧工艺，单机容量 10 ~ 30MW，发电成本 3 ~ 6 美分/(kW · h)，预计到 2015 年装机容量将达 16.3GW。目前生物质燃料（包括垃圾燃料）焚烧锅炉基本是链条炉或炉排炉，生物质混烧锅炉有流化床锅炉和煤粉炉，容量在 15 ~ 715MW 规模不等。生物质能燃烧的净生物能转化效率为 20% ~ 40%，负荷可达 100MW 以上，如采用与煤共混燃烧技术时可以得到更高的转化效率。大型燃煤电厂将生物质与矿物燃料联合燃烧已成为新的概念，如将木材及其废弃物、农业废弃物和城市生活垃圾燃烧发电或直接供热，目前生物质燃烧发电容量可达到 50MW。

至 2007 年年底，我国核准的生物质规模化发电项目已有 87 个，总装机容量达 2200MW，全国已建成投产的生物质直燃发电项目超过 15 个，在建项目约 30 个，主流技术采用丹麦的锅炉，示范项目有国内自主研发的技术。同时我国的城

市生活垃圾焚烧发电技术也得到迅速发展,已能实现配套设备的国产化,但同国外比较我国在生物质燃烧发电规模、热效率及其污染物控制方面仍较落后。生物质直接燃烧技术中主要需解决以下问题:生物质燃烧过程颗粒团聚及其完全燃烧、锅炉受热面积灰机理与腐蚀防止、锅炉尾部烟气除尘、锅炉底部稳态连续排渣、燃烧污染物控制及灰渣利用、低成本多种生物质原料致密成型技术等。

2) 生物质气化(热解气化)

生物质气化是指固体生物质原料(薪柴、锯末、麦秸、稻草等)经压制成型或经简单的破碎加工处理后,在部分缺氧和高温条件下,与气化剂反应,进行气化裂解获得含 CO 、 H_2 和 CH_4 及 C_nH_m 等可燃气体的过程。气化主要反应是生物质碳与气体之间的非均相反应和气体之间的均相反应。此气化过程仅仅产生燃气和灰烬残余物, NO_x 和 SO_2 等有害气体含量少,且经济性高,是生物质清洁利用的一种主要形式。生物质气化的目的是得到洁净的产品气,而后用于农村炊事、区域供暖、天然气源补充或合成气源,因此要采用催化剂来抑制或消除热解反应中产生的焦油,同时捕集粉尘颗粒。

生物质气化技术起源于18世纪末,经历了上吸式固定床气化炉、下吸式固定床气化炉、流化床气化炉和熔融气化炉等发展过程。目前,生物质气化主要向发电、区域供热、供气与发电联产、气化合成等方向发展。美国的生物质整体气化联合循环(BIGCC)气化发电示范工程代表生物质发电技术的世界先进水平^[21],装机容量达到63MW,可生产中热值气体,气化效率保持在75%,印度采用BIGCC发电的能量利用效率也达到45%~55%。BIGCC和HATC作为先进的生物质气化发电技术,从1990年起引起了各国极大的兴趣,已在世界上不同地区(如巴西、美国和欧洲联盟)建成示范装置,规模为0.5~3MW(HATC)、7~30MW(IGCC),发电效率达35%~40%。近年欧美开展了其他技术路线的研究,如比利时和奥地利生物质气化与外燃式燃气轮机发电技术,美国与丹麦的斯特林循环发电等,但这些技术仍未成熟,成本较高。现在生物质热解气化所产生的气体均是低热值气体,一般发热量为 $5000\text{kJ}/\text{m}^3$ 。寻找低成本和高热值的生物质热解气化技术是一个重要的发展方向。

我国生物质气化技术正日趋成熟,从单一固定床气化炉发展到流化床、循环流化床、双循环流化床和氧化气化流化床等高新技术;由低热值气化装置发展到中热值气化装置;由户用燃气炉发展到工业烘干、集中供气和发电系统等工程应用,建立了各种类型的试验示范系统。中科院广州能源研究所在江苏建成了5.5MW生物质气化气-蒸汽整体联合循环发电示范工程,取得了较好的效果^[22]。

生物质气化技术需要解决的突出问题有:焦油释放机理与脱除控制、气化效率提高、燃气热值与品质提升、气化过程的稳定性及其对原料的宽适应性、污染

物主要为焦油废水的环境行为控制。

3) 生物质液化

生物质液化分为直接液化和间接液化。间接液化又称为生物质热解液化。

(1) 生物质热解液化。

热解液化是指在隔绝空气条件和 500℃ 左右的高温条件下将生物质热分解, 产生液体燃料油 (又称生物油) 或化学物质的一种技术。产生的液体是水和有机物混合物, 经过进一步的分离和提纯得到生物质燃油或用作其他工业原料。热解过程工艺参数包括热解温度、传热速率、压力、停留时间以及生物质原料的种类、粒度等的选择直接决定了热解产物的组成和比例及转化率, 而热解工艺参数主要由热解反应器的类型及其热传递方式决定。根据热解过程原料停留时间和温度的不同, 热解工艺可分为: 常规热解、快速热解和闪速热解。常规热解的液体产率偏低, 闪速热解的工艺实现较为困难, 但快速热解过程较易实现, 且液体产率可达 80 %, 成为目前热解技术的研究焦点。常用的生物质热解液化反应器类型主要有携带床反应器、涡旋反应器、循环流化床反应器、旋转锥反应器、流化床反应器、下降管式反应器、喷动床反应器等。虽然欧美等发达国家在生物质快速裂解的工业化方面研究较多, 但生物质快速热解液化理论研究始终严重滞后, 很大程度制约了该技术水平的提高与发展。目前, 欧美等国已建成各种生物质液化示范装置, 至今还没有产业化。根本原因是, 生物油组成十分复杂。提高生物油品质、开展生物油低成本精制新方法的研究将是该技术能否产业化的关键。

自 1990 年来我国陆续开展了生物质热裂解技术的实验研究, 主要针对反应器结构和形式、热裂解工艺等方面, 包括旋转锥快速热解、循环流化床、热等离子体快速热解等液化装置。目前热裂解产生的生物油得率可达到 50%。但在这方面尚没有成熟的理论和应用技术, 还没有商业化装置应用。生物质热解液化需要解决的突出问题: 热解液化过程的生物油品质提升、生物油的低成本精制、生物油的组分高效分离、整体过程的能效提升。

(2) 直接液化技术。

直接液化技术采用机械压榨或化学提取等工艺, 从生物质中直接提取生物油。化学方法液化可分为催化液化和超临界液化。催化液化过程中, 溶剂和催化剂的选择是影响产物产率和质量的重要因素。常用的催化剂有碳酸钠和硫酸, 溶剂包括水、苯酚、多元醇和环状碳酸盐。超临界液化主要是利用超临界水黏度低、传质阻力小、扩散性能好、热容高、反应体系的温度更易均匀等特点而进行的生物质液化。最近欧美等国正积极开展这方面的研究工作, 包括超临界水液化纤维生物质、超临界水和超临界甲醇液化木质素生物质和生物质直接超短接触液化等技术。其研究的重点是其反应机理及理论模型, 同时也在积极开发生物油精

炼和品位提升的新工艺。很多研究者也致力于煤与废弃生物质共液化的研究。

我国开展生物质直接液化技术的研究起步较晚、进展缓慢，主要是因为研究以单项技术为主，缺乏系统性，特别是在高效反应器研发、工艺参数优化、液化产物精制等方面存在明显差距。生物质直接液化需要解决的突出问题有过程工艺的稳定性与放大、液化产物的高效分离与精制、整体过程的能效提升。

2. 生物化学转化技术

1) 乙醇发酵技术

目前，生物质转化乙醇技术主要有两种方式：液体基质发酵和固体可消解性基质发酵。液体基质发酵为传统的乙醇发酵方式，主要有序批式、连续式和半连续式等；固体可消解性基质发酵（或称固态发酵）是指培养基底物为固态的不溶于水的可消解性多孔介质材料，微生物从半饱和的固态多孔基质吸收营养物。由于世界粮食供应的紧张状况及丰富的纤维素资源，利用各种非粮食类的纤维素进行生物乙醇的厌氧发酵研究得到重视。纤维素物质乙醇转化主要包括两步：纤维素预处理、纤维素厌氧发酵。纤维素预处理方法有物理法、化学法和生物法三类，目前在这方面开展的研究较多；而纤维素物质的厌氧发酵工艺又分为：分步水解发酵法、同步水解发酵法和复合水解发酵法。水解剂有酶催化剂、酸（超稀酸）催化剂、复合型催化剂。

国外在生物质乙醇转化方面开展了大量的研究工作，特别是加拿大在纤维素乙醇转化技术方面取得了领先优势，而美国新泽西州建成了年生产能力达到 20 万 m^3 纤维素乙醇的工厂。此外，日本、西班牙等国也积极地开展了这方面的研究。我国早在“十五”期间已将纤维素乙醇研究工作提上日程，在国家 863 计划中列为研究课题进行重点攻关。2006 年，河南天冠集团开始建设年产 3000t 的纤维素乙醇项目，使利用农作物秸秆类纤维质原料生产乙醇成为现实；中粮集团在广西建成以木薯为原料的大型工厂，正在建设以玉米秸秆为原料，年产燃料酒精 5000t 的中间试验厂。但我国对高效厌氧发酵反应器研制以及高效的纤维素降解酶和纤维素预处理技术等方面的研究仍明显不足。

2) 沼气发酵技术

沼气发酵装置称为厌氧消化器，俗称沼气池，是指各种有机质在微生物作用下厌氧发酵制取沼气的密闭装置，是沼气发酵的核心设备。当前国内外运行的沼气池类型较多，主要有常规厌氧反应器、全混式反应器、塞流式反应器、上流式厌氧污泥床反应器、内循环厌氧反应器、膨胀颗粒污泥反应器、厌氧生物滤床。目前将沼气发酵产气与发电相结合的综合技术得到了发展，用于沼气发电的设备主要有内燃机和汽轮机。国外沼气发电机组主要用于垃圾填埋场的沼气处理工

艺。目前,美国在沼气发电领域处于世界领先水平,现有 61 个填埋场使用内燃机发电,总容量已达 34 万 kW。欧洲用于沼气发电的内燃机,较大的单机容量在 400~2000kW,填埋沼气的发电效率约为 $1.68 \sim 2 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

我国沼气技术发展较快,截止 2005 年年底,我国已建成农村户用沼气池 1700 多万口,年产沼气约 65 亿 m^3 。2009 年我国最大的沼气发电示范项目在北京建成,该发电厂除每年向电网提供 1400 万 kW 的电力外,还产生相当于 4500t 标煤的余热用于供暖。但我国大中型沼气发电工程普遍存在的问题是沼气发酵原料转化率低、产气率低,运行稳定性差、厌氧发酵后的深度处理技术落后、沼气内燃机发电效率低和余热利用率低等,这些问题都导致热电联产机组的总热效率降低。同时,沼气发酵技术中的微生物代谢能量学、生物膜动力学、悬浮污泥系统与生物膜系统反应器内的非均相动力学、热力学、传热传质学的基础研究均有待加强。

3) 生物制氢技术

由于生物制氢技术在当前的能源多元化战略和环境保护中具有重要的地位,国际上经济发达国家正大力开展这方面的研究工作。根据产氢细菌种类的不同,生物制氢可分为三大类:发酵细菌制氢、藻类光合制氢和光合细菌制氢。发酵型细菌制氢是指厌氧发酵细菌直接转化有机底物为 H_2 和 CO_2 ,包括梭菌、肠杆菌和芽孢杆菌等,其优点是不需消耗光能、设备简单;藻类光合制氢是光合藻类(包括蓝细菌)利用太阳光通过光合作用将水分解为 H_2 和 O_2 ,其光合制氢过程是以自然界丰富的水为原料,将清洁而廉价的太阳光能转化为氢能,生产过程中无任何有机废物的排除,不污染环境;光合细菌制氢是指在光能驱动下光合细菌通过消耗有机物产生氢气,其优点是光合细菌能利用各种有机酸为底物,具有较高的底物转化率,可吸收广范围的光能为驱动力。研究表明将光合细菌制氢与发酵型细菌制氢有机结合起来,能充分利用发酵型细菌产生的有机酸,可有效地提高产氢率和降低污染物 COD。

目前人们对产氢机理进行了大量的研究^[23],由于生物代谢形式的多样性和复杂性,还没有完全认识产氢的机理,特别是代谢途径。对于制氢反应器的研究大多为操作条件和反应器结构形式等因素影响的实验研究,大部分集中于厌氧发酵制氢反应器。从研究生物制氢反应器的传输特性入手,以提高反应器的产氢率以及进一步提高厌氧细菌在发酵制氢的产氢量和原料利用率等正逐渐得到重视。

我国在这方面的研究起步较晚,部分科研院所分别在厌氧发酵制氢和光合细菌生物制氢方面开展了相应的研究工作。但同国外比较,我国在微生物制氢的基础研究差距很大,工作偏于产氢菌生理生态学等机理研究和工程应用研究,对生物制氢反应器内传输机理与特性、反应器最优设计与控制、高效产氢菌群构建和

分子生态学诊断、代谢调控机理等研究仍然不足。

3. 酯化转化技术

酯化转化技术包括生物酯化技术和化学酯化技术。生物酯化技术利用固定化酶或细胞作催化剂,对油脂中的三酸甘油酯与甲醇(或乙醇)进行酯交换反应获得烷基甲酯或烷基乙酯。化学酯化技术利用酸碱催化剂对油脂中的三酸甘油酯与甲醇(或乙醇)进行酯交换反应获得烷基甲酯或烷基乙酯。现阶段工业上用的主要油脂原料是地沟油,作为实验室研究用的原料包括动物脂肪、文冠果、麻疯树、能源微藻和一些食用油脂;研究开发的技术有液体酸/碱催化酯化、固体酸/碱催化酯化、酸碱二元催化剂催化酯化、固定化酶催化酯化以及固定化细胞催化酯化。结合生物质快速热解的生物油,生物油酯化成为最近的研究热点。

我国的生物柴油技术研究虽然起步很晚,但是进展很快,年产能达到100万t,适用于多种低品质原料,多项技术指标达到世界先进水平,特别在地沟油和麻疯树油脂的酯化工艺方面,被外界高度关注。但是基础研究欠缺、生产规模偏小、连续运行的稳定性差、生物柴油反应器设计与加工能力弱、固定化酶成本偏高。我国基础研究领域与发达国家的差距主要体现在下面几个方面:酯化反应过程的热质传递机理及其对催化反应动力学的影响机制;生物柴油集成工艺中的能源输配理论与调控;生物柴油副产物的高效利用;固定化酶/固定化细胞催化酯化过程中的催化剂中毒失活机理与抑制;生物柴油提质为航空煤油的工艺控制。

7.2.3 风能

风能是可再生能源中发展最快的清洁能源,也是最具有大规模开发和商业化发展前景的能源形式。适合进行风力发电的风能密度一般要求为 $0.2\text{kW}/\text{m}^2$ 以上。风力机的单机容量已经从十年前的几千瓦级发展到近年的兆瓦级,风轮叶片直径从15m到82m,轮毂的高度从22m到100m,风力机每单位面积重量从20世纪80年代的 $32\text{kg}/\text{m}^2$ 降到现在的 $5.026\text{kg}/\text{m}^2$,风力发电成本已经得到大幅度降低,风能资源利用率也得到了显著提高^[24]。兆瓦级风力机已成为当前主流机型,10MW级风力机正在研制中。

我国陆地离地面50m高度技术可开发面积(风功率密度达到 $300\text{W}/\text{m}^2$)约54万 km^2 ,风能资源技术可开发量约为26.8亿kW。离岸20km的海域范围内技术可开发面积约为3.7万 km^2 ,离海面50m高度层风能资源技术可开发量约为1.8亿kW。风能资源最丰富的地区包括内蒙古、新疆、甘肃的河西走廊、青藏高原、东北地区以及东南沿海和岛屿等。

风能利用不仅对节能减排和环境保护有重要意义,同时也推动了风电装备产业的发展,我国已经形成规模化的风电装备产业,至2010年年底,中国新增风电装机容量18928MW,累计风电装机容量44733MW,双居全球第一位。预计到2020年,中国风电装机总量可能超过2.5亿kW,成为主要能源之一。目前,中国已启动6个千万千瓦级风电基地建设,总装机容量约为100GW。然而,我国风电产业的发展过度依赖于国外技术,风能利用方面的基础研究严重滞后于产业发展的要求。

1. 风资源评估与微观选址中的科学问题

大尺度兆瓦级风电机组已经成为当前的主流,然而现在的风资源数据是基于10m或50m高度的测风普查结果,这为国家和企业的正确决策带来困难,因此急需获得我国70~100m高度风资源及其分布,为国家和企业的决策提供切实可行的依据。

我国地形和气候等条件远比欧美的复杂,而我国目前又普遍采用来自欧美的技术和软件,因此,需要开展针对我国复杂地形地貌风场微观选址中的基础问题和适合我国独特气候特色的分析与模拟软件的研究。

2. 大气边界层中风特性的理论与实验研究

对大气中风速和风向的研究主要有两种方法:第一种是通过实测,进行长期跟踪,再应用数学统计方法进行研究和分析;第二种是结合数学统计方法,通过建立理论模型对其分布规律进行研究。一些研究者结合气象学以及空气动力学方法,对风能的分布进行了研究,提出风能气象学的概念,寻求气象学与风能之间的关系,认为风能气象学是基于边界层气象学、气候学以及地理学的一门科学。在进行风能资源评估时,十分重视中、小尺度数值模式用于模拟近地层的大气风场分布。随着海上风力发电技术的迅速发展,海上风场研究得到了普遍关注。

3. 风力机理论、新型叶片外形与材料以及风力发电系统新型控制方法

随着风力机单机容量的大型化,先进的风力机必须具有以下主要特征:考虑到长叶片绕流的三维特性,采用全三维的气动设计理论与方法来设计叶片^[25];考虑到中国南北部气候的不同特点,研发具有抗台风叶片和抗沙尘暴能力的叶片;采用变转速控制,以跟踪最佳效率;采用变桨距控制,以降低构件载荷;采用桨叶独立变桨距,以满足大直径风轮的需要;采用大挠度柔性桨叶,以降低风

轮重量改善受力情况；采用双馈发电机，以满足并网发电的要求。风力机技术发展的趋势是重量更轻、结构更具柔性、直接驱动发电机（无齿轮箱）和变转速运行。风力机单机容量的大型化要求我们必须面对其气动弹性问题，如果机组设计不当，就会造成叶片-风轮-塔架-电机系统气动弹性不稳定，从而造成机组破坏。自从1973年第一次石油危机以来，欧美国家加大了风力发电技术的研究，形成一系列风力机分析和设计方法。

开发适合风力机叶片的翼型是提高风力发电效率的基础。国际上风力机专用翼型研究始于20世纪80年代中期，风能技术发达国家如美国、丹麦、瑞典等都发展各自的翼型系列。另外，除了传统的水平轴风力机外，寻求新的高效风能吸收模式也是今后风能技术发展的趋势。

叶片的重量是风力机大型化的重要指标之一，叶片材料从最初的木制品逐步过渡到玻璃纤维增强复合材料，而今采用碳纤维复合材料（CFRP）的超大型叶片式风力发电机组正在蓬勃兴起。

风能具有间断性和随机性的特点，风能的波动会造成风力发电机负荷的随机变化，使风力发电机输出功率不稳定，对并网发电带来很大的影响，风电系统的自动控制和优化设计是风电问题研究中的重要课题。变速风力机是目前研究的热点之一，目的是为取得气动效率、载荷和控制的最佳综合性能。一些非线性控制方法，如模糊控制理论及神经网络控制理论，已经开始应用于风力发电控制系统，风力机的变桨距、变转速调节技术使兆瓦级风力机的应用变成现实。

4. 大型风电机组多体动力学及气弹稳定性

随着风电机组单机容量的增大，叶片尺寸不断加长，刚度越来越低。在气动载荷及惯性力的作用下，叶片会发生较大幅度的变形。为了减少因叶片的变形而偏离设计工况，预弯式叶片技术已经被广泛应用于当前的大型风电叶片设计中。然而，对于大型风电机组，桨叶-风轮-塔架-电机系统-基础等部件之间的耦合关系密切，气动弹性稳定性问题日益突出，深入研究这类多体动力学特性，揭示其气弹耦合机理，研究其气弹稳定性条件及稳定性范围是今后必须着力关注的重要问题。

对于近海风电机组，还需要研究在波浪、潮汐等非定常载荷作用下，基础-塔架-桨叶-风轮-电机系统的多体动力学特性及稳定性以及机组在大湿度、高盐分条件下的防腐蚀措施。

5. 中、远海上风能利用中的基础问题研究

中、远海可以利用的风资源总量远远超过近海，开展适合中、远海风能利用

中的新型风能吸收模式研究及悬浮式风电场建设必然成为今后的热点。

目前,对于固定基础的海上水平轴风力机,其主要问题在于设备成本和安装费用高昂,设备可靠性低,运行和维护成本较高等问题,随着海上风机安装的水深的递增,风电机组造价呈指数形式增加。而悬浮式海上水平轴风电机组的风电设备安装简单,便于迁移,是深水区域风能利用的有效方式,被认为是海上风电发展的未来,已经开始受到了欧洲和美国的格外重视。

但是,海上水平轴风力机重心高,在波浪、潮汐、台风等载荷作用下,稳定性要求很高,制造安装维护的成本相对较高。因此,高效的聚能增速型垂直轴风力机可能是远海风能利用的有效模式,它具有重心可调、结构简单、制造安装维护成本低、稳定性可控等特点,特别适合安装于海洋平台上。开展波浪能、潮汐能、洋流能及风能的综合利用,揭示它们之间的耦合机理及这类机组的动态特性与稳定性是海洋风能利用的基础。

6. 风能利用的方式与多能互补综合利用系统

储能技术和多能互补综合利用系统技术是解决风力发电机组功率稳定输出的一种有效方法。近年来,风力机-柴油机联合发电系统和风能-太阳能联合发电系统等多能互补综合利用系统,以及在风能利用系统中增加储能装置已成为世界各国关注的研究课题。在风能储能技术中,飞轮储能技术较为成熟,超导储能技术代表了柔性交流输电的新技术方向,能吸收或发出有功和无功功率来快速响应电力系统需要。另外,风能-太阳能综合发电技术可充分利用风能与太阳能的气候互补、季节互补、昼夜互补特点,利用风能和太阳能制氢、储氢,再利用燃料电池发电的综合能源利用系统,也可解决风力和太阳能发电的稳定性问题,已得到广泛重视。

风能利用的方式除发电外,还包括风力驱动海水淡化装置,利用太阳能热气流“烟囱效应”的太阳能-风能发电装置,以及风力制热、制冷等。风力制热是将风能转换成热能,目前有三种转换方法:一是风力机发电,再通过电热器发热;二是由风力机绝热压缩空气将风能转换成空气压力能和热能;三是由风力机驱动液体流过阻力件,利用液体的黏性耗散制热。

近年来,我国风力机技术研究得到了迅速发展,兆瓦级机组已实现商品化。在风力机基础理论研究方面也开展了卓有成效的工作。目前,国家能源局已分别在华锐风电集团、国家电网公司或中国科学院工程热物理研究所建立了海上风电研发中心、风能并网系统研发中心和风电叶片研发中心。

7.2.4 地热能

1. 地热能发电利用

世界上利用地热流体发电,总装机容量超过100MW的目前已有20多个国家,根据地热田形式可分为蒸汽型地热发电和热水型地热发电两种^[26]。蒸汽型地热发电把地热田中的干蒸汽直接引入汽轮发电机组发电,有背压式和凝汽式两种系统,该种利用方式简单,有干蒸汽地热田的地区很少,开采难度大,故发展受到限制。比较普遍的是汽、水两相或热水型地热田。目前有两种循环系统:①闪蒸系统。高压汽水混合流体或热水从井中抽至地面,降压“闪蒸”成蒸汽送至汽轮机做功,分离后的热水可继续利用或者再回灌到地层。②双循环系统。地热流体首先流经热交换器,将地热能传给另一种低沸点工质沸腾而产生蒸汽,工质蒸汽进入汽轮机做功后进入凝汽器和工质泵,再通过热交换器吸热从而完成发电循环。这种系统适合于矿化度高、腐蚀性强和不凝结气体含量高的地热资源。发展双循环系统的关键是开发高效热交换器。

2. 地热直接利用

中低温地热直接利用非常广泛,如烘干谷物、工业加工与工艺加热干燥、取暖、建造农作物温室、温泉沐浴、医疗、水产养殖等。

我国高温地热资源主要集中在西藏、云南、台湾等地,而中低温地热资源非常丰富,如广东、辽宁、河北、山东、陕西、天津、北京等地。地热资源分为热对流型地热资源和热传导型地热资源。中低温地热资源量大面广,在一些地区起到了积极的节能和环保作用。

20世纪70年代后期我国开始研究地热发电,由于缺乏经验及其他原因,建立的试验性地热电站,大部分效率太低而停止运行。适合发电的地热资源在我国主要分布在西藏、川西一带,西藏羊八井地热电站是一个成功例子,年发电量超过1亿kW·h,对拉萨地区的供电起着重要的作用。目前我国内地共有5座地热电站在运行。

中低温地热的直接利用在我国非常广泛,直接利用地热资源的热能已超过13000GW·h,在热采暖地热温室、地热养殖和温泉浴疗等方面有了很大的发展,直接利用地热热能总量位于世界首位已连续多年。地热供暖主要集中在我国的北方城市,分直接供暖和间接供暖。直接供暖以地热水为工质供热,间接供暖是利用地热水加热供热介质,再利用介质循环供热。

近年来,低温地热与热泵的有机结合更好地发挥了地热优势,有效地扩大了

利用规模和范围。与空气源热泵比较可节能 30 % , 与纯电力或常规燃料供热及制冷比较可节能 60 % 。利用浅层地下水式热泵、土壤源式热泵等在我国中原地区、华东地区、甚至华北地区的冬季采暖、夏季空调用能中将发挥越来越重要的作用。

7.2.5 海洋能

陆地矿物燃料日趋枯竭, 环境污染日趋严重, 一些主要海洋国家纷纷把目光转向海洋, 促进和加快人类开发利用海洋能源的步伐, 鼓励发展包括海洋能在内的多种可再生能源。截至 2008 年年底, 全球有超过 25 个国家从事海洋可再生能源的开发活动。

1. 潮汐能

国外潮汐能电站的开发始于 19 世纪, 直到 1967 年世界上第一座大型潮汐电站——朗斯潮汐电站在法国投入商业运行, 该电站装机 24 万 kW。1984 年加拿大建成芬迪湾安纳波利斯实验潮汐电站, 装机容量 2 万 kW。1980 年我国江夏潮汐电站建成, 总装机 3200kW, 2007 年又新建了一台新型的潮汐机组, 总装机容量达到了 3900kW, 位列世界第三。目前, 不少国家都提出了一些新的发展计划: 美国的帕萨马廊迪潮汐电站 300 万 kW; 英国塞文河口电站计划装机 500 万 kW; 法国蒙对圣密歇电站计划装机 1200 万 kW^[27]。

我国自 1958 年开始研究开发利用潮汐能, 于 60 年代开始建设潮汐电站, 至 1985 年先后建成沙山、岳浦、江夏等约 40 座潮汐电站, 均属于小型潮汐电站, 由于种种原因, 大部分已经关闭, 目前还在运行的仅有 4 座电站。近年来, 随着科技攻关力度的加大, 与潮汐发电有关的技术进步加快, 小型潮汐发电技术基本成熟, 具备开发中型潮汐电站的条件。但是现有潮汐电站整体规模和单位容量还很小, 水轮发电机组尚未定型标准化, 关键问题是中型潮汐电站水轮发电机组核心问题没有完全解决。

2. 潮流能

潮流能由于能量密度高、载荷稳定、可预测性强等优点, 成为海洋能开发利用研究热点之一。英国、加拿大、爱尔兰、美国等国家已走在了世界的前列, 在对潮流能开发利用选址、经济技术和环境影响等全面评估基础上, 提出了多种类型的原型设计, 并在实验室、海域进行了试验和测试, 各种技术正在步入规模化应用阶段。

潮流能获能装置是潮流发电中关键的部件之一。据统计, 在潮流能发电领

域,已提出的包括水平轴、竖轴和创新型潮流能获能装置结构形式有几十种。其中应用最为广泛的潮流水轮机叶片翼型设计可以充分借鉴风轮设计的相关理论和内容,但由于潮流流场和风场存在巨大的差别,潮流水轮机的设计充分考虑潮流环境的特性,在流体动力学的基础上,改进、优化相关设计方法。随着计算机技术的发展和计算流体力学研究的不断深入,开展和三维湍流模型相适应的、符合水轮机真实流动的新的流动设计方法研究已经成为了可能。这种仿真研究能够帮助人们深入了解水轮机周围复杂非定常流动和漩涡运动特性。

我国潮流发电研究始于20世纪70年代末,首先在舟山海域进行了8kW潮流发电机组原理性试验。80年代以来,哈尔滨工程大学、东北师范大学、中国海洋大学和浙江大学等几家高等院校在海洋潮流能发电原理性样机和小规模样机试验方面进行了研究,取得了一定的研究成果。但相比国外技术,我国目前潮流能开发利用技术所处研究阶段和装置装机容量上均存在一定差距,迫切需要进一步持续加大基础研究和应用研究的资金和政策支持力度,促进规模化应用和产业化发展。

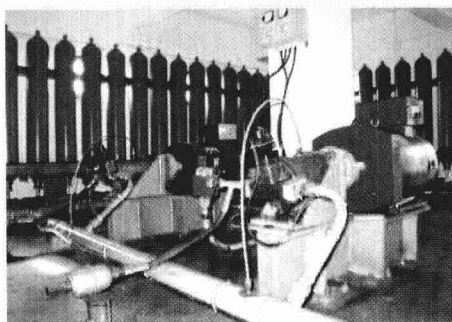
3. 波浪能

世界上主要的海洋大国都十分重视波浪能的开发,关于波能转换的各种专利已经超过1500项。目前最常见的是振荡水柱+空气叶轮的波浪能装置,装机容量1kW以下的大约有1000多个,用于为导航浮标供电,已经走向商业化;装机容量数十到数百千瓦的波浪能装置大约有10座左右。最大的一座是欧盟建造的2MW装置Osprey,可惜在下水时破损。成功建成的有英国和挪威的500kW装置各一座,葡萄牙400kW装置一座,日本120kW装置一座、40kW装置一座、1kW以下装置600余个,我国100kW装置一座、20kW装置一座、1kW以下装置700余个。

我国波力发电技术研究始于20世纪70年代,目前微型波力发电技术已经成熟,小型岸式波力发电技术已进入世界先进行列,航标灯浮用微型潮汐发电装置已趋商品化,在沿海海域航标和大型灯船上推广应用,但波浪能开发的规模远小于挪威和英国,小型波浪发电距实用化尚有一定的距离。与日本合作研制的后弯管型浮标发电装置,属国际领先水平。在珠江口大万山岛上研建的岸边固定式波力电站,第一台装机容量3kW的装置1990年已试发电成功。总装机容量20kW的岸式波力试验电站和8kW摆式波力试验电站均已试建成功。图7.5为建于我国广东汕尾遮浪半岛的波浪能电站。此外,中国海洋大学也加入到波浪能开发利用研究团队,开展离岸固定式越浪装置研究。



(a) 波浪能电站外景



(b) 波浪能电站内景

图 7.5 广东汕尾遮浪半岛波浪能电站

4. 温差能

1979 年美国在夏威夷岛西部沿岸海域建成了一座称为 MINI-OTCE 的温差发电装置, 额定功率 50kW, 净出力 18.5kW, 这是世界首次从海洋温差能获得具有实用意义的电力。由日本佐贺大学海洋能源研究中心提供技术合作, 印度政府斥资约 7 亿日元建造的一艘海洋温差发电试验船发电设备的输出功率是 1000kW, 目前规模是世界最大的, 将于近期开始运转。印度政府在为将来建设 1000 台 50 万 kW 的海洋温差发电设备做准备。如果这一宏伟构想得以实现, 那么其发电容量与目前日本的原子能发电规模相当。在赤道地区, 接近海面的表面海水在太阳照射下温度高达近 30°C , 而水深数百米的深层海水温度是 $5 \sim 10^{\circ}\text{C}$ 。据佐贺大学海洋能源研究中心介绍, 位于北纬 40° 至南纬 40° 的约 100 个国家和地区都可以进行海洋温差发电。日本佐贺大学海洋能源研究中心的上原春男教授从 1973 年着手开发, 1994 年成功发明了采用氨和水的混合物为工作介质的称为“上原循环”的新型循环方式。佐贺大学海洋能源研究中心 2003 年建成了新的实验据点——伊万里附属设施。目前佐贺大学正在利用 30kW 的发电装置进行实证性实验。

随着国外海洋温差能技术的发展, 海洋温差能研究的重点主要集中在闭式循环系统上。关键技术和设备开发主要围绕热力循环和高效蒸发器、冷凝器、氨透平等设备的研制进行, 目的是提高海洋温差能的发电效率。

我国台湾 20 世纪 80 年代开展了温差能方面的研究, 并对热电厂温排水和海水温差的发电进行了可行性研究。1985 年中国科学院广州能源研究所开始对温差能利用中的“雾滴提升循环”方法进行研究。1989 年, 该研究所还对开式循

环过程进行了实验室研究,建造了两座容量分别为 10W 和 60W 的实验台。2004~2005 年,天津大学对闭式和混合式系统进行了理论研究,并对 200W 氨饱和蒸汽透平进行了开发研究。国家海洋局第一海洋研究所在“十一五”期间重点开展了 15kW 闭式海洋温差能系统的整机研究。

7.2.6 论文情况统计与分析

对 Web of Science 数据库中所收录的 2001~2010 年发表的 8 种可再生能源类国际期刊论文进行了统计分析,涉及的期刊包括: *Solar energy*, *Solar energy materials and solar cells*, *Journal of solar energy engineering*, *ASME*, *Renewable energy*, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, *Biomass bioenergy*, *Geothermics*, *Energy conversion and management*。统计分析内容包括文章数量和文章质量两方面,并针对不同国家和地区、不同期刊类型,进行了比对分析。其中,2001~2010 年各国可再生能源期刊论文统计分析结果如表 7.1 所示。

表 7.1 2001~2010 年可再生能源领域各国期刊论文统计分析

文章数量排名	国家或地区	文章数	占文章总数百分比/%	被引次数	文章平均被引次数	文章平均被引次数排名
1	美国	1669	12.95	15459	9.26	9
2	中国	1257	9.75	8992	7.15	18
3	日本	1075	8.34	9064	8.43	13
4	印度	863	6.70	7817	9.06	10
5	德国	734	5.70	8140	11.09	6
6	土耳其	686	5.32	9092	13.25	3
7	西班牙	647	5.02	4729	7.31	16
8	法国	467	3.62	3625	7.76	15
9	英格兰	464	3.60	3811	8.21	14
10	意大利	463	3.59	3071	6.63	21
11	加拿大	401	3.11	3626	9.04	11
12	瑞典	373	2.89	4912	13.17	4
13	澳大利亚	342	2.65	2938	8.59	12
14	希腊	335	2.60	3371	10.06	8
15	韩国	326	2.53	2324	7.13	19

续表

文章数量排名	国家或地区	文章数	占文章总数百分比/%	被引次数	文章平均被引次数	文章平均被引次数排名
16	中国台湾	324	2.51	2349	7.25	17
17	墨西哥	286	2.22	1831	6.40	23
18	伊朗	277	2.15	960	3.47	25
19	荷兰	243	1.89	3512	14.5	2
20	丹麦	230	1.78	4364	18.97	1
21	瑞士	208	1.61	2660	12.79	5
22	巴西	206	1.60	1371	6.66	20
23	泰国	202	1.57	1278	6.33	24
24	埃及	185	1.44	1226	6.63	21
25	比利时	151	1.17	1584	10.5	7

由统计结果可知, 2001~2010年期间, 各国学者在这8种期刊上共计发表论文12888篇, 其中美国以1669篇的数量占据第一位, 其所占比例为12.95%。我国学者(不包括台湾地区学者)以1257篇名列第二位, 占论文总数量的9.75%。其余从数量上排名前十的国家或地区依次为日本、印度、德国、土耳其、西班牙、法国、英格兰和意大利。前十位的国家或地区文章数之和占发表文章总数的64.59%。由该统计结果可以看出, 我国学者在可再生能源领域的研究相当活跃, 论文产出较为丰富, 从数量上已经可以达到世界领先地位。论文数量达到第二位, 还可说明我国在该领域的研究者数量众多, 研究实力较强。

在关注我国学者发表论文数量的同时, 还应当注意到其发表在国际期刊上论文的质量。期刊论文的被引率向来被认为是体现论文质量的重要指标。现以该指标对我国学者发表论文的质量进行评估。

同样由表7.1反映出来论文被引率情况, 从论文总被引次数上看, 美国以总被引15495次名列第一, 我国学者以总被引8992次名列第四。从单篇论文平均被引次数上看, 丹麦学者以18.97次名列第一, 荷兰学者以14.5次名列第二, 其余进入前十的国家或地区依次为土耳其、瑞典、瑞士、德国、比利时、希腊、美国和印度。我国学者名列第十八位, 排名较为靠后, 与发表论文的数量排名不匹配, 这说明了我国在该领域学术论文在质量上与世界强国相比, 还存在一定的差距。目前, 在努力提高我国可再生能源领域学术论文产出数量的同时, 还应采取措施促进研究者提高论文的质量, 从而提高被引用率, 即论文的学术价值。

表 7.2 中列出了各期刊论文及中国学者在该期刊上发表论文的统计情况,由表 7.2 中可以看出,我国学者发表的论文集中在 *Energy conversion and management*, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, *Renewable energy*, *Solar energy*, *Solar energy materials and solar cells* 这 5 种期刊上。从期刊影响因子来看,这 5 种期刊基本处在中间的位置。从表中明显可以看出,在影响因子高的期刊上,我国学者论文的被引率明显要高。

表 7.2 2001 ~ 2010 年可再生能源领域各期刊论文统计分析

期刊	2010 年 影响因子	期刊 文章数	占文章 总数 百分比/%	中国学者 文章数及 被引数	中国学者 文章被 引率	中国学者文章 数占该期刊百 分比/%
<i>Solar energy</i>	2.011	1546	12.0	121/881	7.28	7.83
<i>Solar energy materials and solar cells</i>	3.858	2841	22.0	212/2061	9.72	7.46
<i>Journal of solar energy engi- neering, ASME</i>	0.826	782	6.07	32/81	2.53	4.09
<i>Renewable energy</i>	2.226	2280	17.7	192/1128	5.88	8.42
<i>Journal of wind engineering and industrial aerodynamics</i>	0.831	935	7.25	89/476	5.35	9.52
<i>Biomass bioenergy</i>	3.326	1263	9.80	69/707	10.2	5.46
<i>Geothermics</i>	1.000	378	2.93	8/23	2.88	2.12
<i>Energy conversion and man- agement</i>	1.944	2863	22.2	534/3635	6.81	18.6

我国学者论文在数量上已经反映出我国在可再生能源领域研究的热度,在 *Energy conversion and management* 期刊上,近十年几乎有将近 1/5 的文章出自我国学者之手,这在数量上相当可观,但是同时,我国学者还需要提高科技论文的质量,提高论文的被引用率,努力在高水平的期刊杂志上发表文章。

以上的统计分析内容是针对 2001 ~ 2010 年的总体情况而言,然而并没有涉及各项指标随时间推移的变化趋势分析,下面的文字将对这部分内容进行分析。

现将 2001 ~ 2010 年的 10 年时间划分为两个单独阶段进行分别统计,即 2001 ~ 2005 年和 2006 ~ 2010 年,同样以上述指标为分析要素,观察其变化情况,得出分析结论。

表 7.3 和表 7.4 分别给出了 2001 ~ 2005 年和 2006 ~ 2010 年各国发表论文统

计结果,从统计的 8 种期刊来看,2001 ~ 2005 年该领域国际上发表论文共计 5251 篇,2006 ~ 2010 年发表论文共计 7637 篇,5 年之中发表论文总数增长了 45.4%,这充分说明该研究领域在国际上已经是一个越来越热门的研究领域,发表的论文数量不断增多,各国学者均看好在该领域的发展潜力。

表 7.3 2001 ~ 2005 年可再生能源领域各国期刊论文统计分析

文章数量 排名	国家或 地区	文章数	占文章总数 百分比/%	被引次数	文章平均 被引次数	文章平均被 引次数排名
1	美国	805	15.33	10012	12.44	16
2	日本	588	11.20	6445	10.96	20
3	德国	343	6.53	5790	16.88	6
4	中国	327	6.23	4139	12.66	14
5	土耳其	309	5.88	6359	20.58	2
6	印度	298	5.68	4467	14.99	9
7	西班牙	201	3.83	2611	12.99	12
8	英格兰	193	3.68	2337	12.11	18
9	瑞典	177	3.37	3276	18.51	4
10	意大利	170	3.24	1910	11.24	19
11	加拿大	166	3.16	2397	14.44	10
12	法国	157	2.99	1936	12.33	17
13	澳大利亚	148	2.82	1931	13.05	11
14	墨西哥	127	2.42	1175	9.25	23
15	希腊	124	2.36	1873	15.10	8
16	埃及	108	2.06	944	8.74	25
17	荷兰	108	2.06	2480	22.96	1
18	韩国	99	1.89	1241	12.54	15
19	丹麦	94	1.79	1814	19.30	3
20	瑞士	89	1.69	1647	18.51	4
21	中国台湾	86	1.64	1099	12.78	13
22	巴西	78	1.49	769	9.86	21
23	泰国	75	1.43	660	8.80	24
24	以色列	71	1.35	665	9.37	22
25	马来西亚	53	1.01	863	16.28	7

表 7.4 2006 ~ 2010 年可再生能源领域各国期刊论文统计分析

文章数量 排名	国家或地区	文章数	占文章总数 百分比/%	被引次数	文章平均 被引次数	文章平均被 引次数排名
1	中国	930	12.18	4853	5.22	17
2	美国	864	11.31	5447	6.30	8
3	印度	565	7.40	3350	5.93	10
4	日本	487	6.38	2619	5.38	13
5	西班牙	446	5.84	2118	4.75	20
6	德国	391	5.12	2350	6.01	9
7	土耳其	377	4.94	2733	7.25	6
8	法国	310	4.06	1689	5.45	11
9	意大利	293	3.84	1161	3.96	23
10	英格兰	271	3.55	1474	5.44	12
11	伊朗	252	3.30	762	3.02	25
12	中国台湾	238	3.12	1250	5.25	14
13	加拿大	235	3.08	1229	5.23	16
14	韩国	227	2.97	1083	4.77	19
15	希腊	211	2.76	1498	7.10	7
16	瑞典	196	2.57	1636	8.35	4
17	澳大利亚	194	2.54	1019	5.25	14
18	墨西哥	159	2.08	656	4.13	22
19	丹麦	136	1.78	2565	18.86	1
20	荷兰	135	1.77	1040	7.70	5
21	巴西	128	1.68	607	4.74	21
22	泰国	127	1.66	622	4.90	18
23	瑞士	119	1.56	1021	8.58	3
24	比利时	106	1.39	946	8.92	2
25	葡萄牙	79	1.03	310	3.92	24

从我国的统计数据来看, 2001 ~ 2005 年我国学者共计发表论文 327 篇, 占 5 年文章总数的 6.23%; 2006 ~ 2010 年间, 我国学者共计发表论文 930 篇, 占 5 年文章总数的 12.18%。从论文数量上来看, 增长了 184.4%, 从占国际论文总量百分比来看, 增加了 5.95%。5 年的时间, 我国学者论文数量大为提高, 在国

际可再生能源领域的研究权重大大增加。

对论文质量进行分析,我国学者 2001 ~ 2005 年发表的论文,以平均被引率 12.66 篇名列第 14 位,2006 ~ 2010 年发表的论文,以平均被引率 5.22 篇名列第 17 位。5 年的变化期间,从被引率排名这一指标来看,我国可再生能源领域学术论文的质量,反倒是有所下降,这充分暴露出我国当前科学研究中存在的只求数量不求质量的问题。

表 7.5 和表 7.6 中对不同期刊的分析结果表明,5 年中我国学者论文数占期刊论文总数之比均有所增长,这是由于我国论文总数增长导致的。在超过一半的期刊中,我国学者的论文均能达到 10% 以上,个别期刊甚至能够超过 20%。

表 7.5 2001 ~ 2005 年可再生能源领域各期刊论文统计分析

期刊	2010 年 影响因子	期刊 文章数	占文章 总数 百分比/%	中国学者 文章数及 被引数	中国学者 文章被引率	中国学者文章 数占该期刊 百分比/%
<i>Solar energy</i>	2.011	643	12.2	29/391	13.48	4.51
<i>Solar energy materials and solar cells</i>	3.858	1227	23.4	56/850	15.18	4.56
<i>Journal of solar energy engineering, ASME</i>	0.826	405	7.71	8/34	4.25	1.98
<i>Renewable energy</i>	2.226	763	14.5	51/552	10.82	6.68
<i>Journal of wind engineering and industrial aerodynamics</i>	0.831	503	9.58	41/339	8.27	8.15
<i>Biomass bioenergy</i>	3.326	502	9.56	18/363	20.17	3.58
<i>Geothermics</i>	1.000	210	4.00	6/20	3.33	2.86
<i>Energy conversion and management</i>	1.944	998	19.0	118/1590	13.47	11.8

表 7.6 2006 ~ 2010 年可再生能源领域各期刊论文统计分析

期刊	2010 年 影响因子	期刊 文章数	占文章 总数 百分比/%	中国学者 文章数及 被引数	中国学者 文章被引率	中国学者文章 数占该期刊 百分比/%
<i>Solar energy</i>	2.011	903	11.8	92/495	5.38	10.2
<i>Solar energy materials and solar cells</i>	3.858	1614	21.1	156/1228	7.87	9.67

续表

期刊	2010 年 影响因子	期刊 文章数	占文章 总数 百分比/%	中国学者 文章数及 被引数	中国学者 文章被引率	中国学者文章 数占该期刊 百分比/%
<i>Journal of solar energy engineering, ASME</i>	0.826	377	4.95	24/48	2.00	6.37
<i>Renewable energy</i>	2.226	1517	19.9	141/588	4.17	9.30
<i>Journal of wind engineering and industrial aerodynamics</i>	0.831	432	5.66	48/140	2.92	11.1
<i>Biomass bioenergy</i>	3.326	761	9.96	51/351	6.88	6.70
<i>Geothermics</i>	1.000	168	2.20	2/3	1.50	1.19
<i>Energy conversion and management</i>	1.944	1865	24.4	416/2066	4.97	22.3

另外, 这项分析也反映出我国学者在某些个别领域研究工作较少, 不符合我国在可再生能源领域的整体科研规模。如 *Geothermics*, 地热学方面的研究, 2001~2005 年, 我国学者论文占其总量的 2.86%, 2006~2010 年期间仅占 1.19%; *Biomass Bioenergy*, 生物质能的研究, 2001~2005 年, 我国学者论文占其论文总量的 3.58%, 2006~2010 年期间占 6.70%。

综上所述, 可以看出, 其一, 国际可再生能源领域的研究热度将会进一步提高, 各国的投入将会进一步加大, 论文数量将会有进一步的增长; 其二, 我国可再生能源领域的研究在国际上占有相当重要的份额, 研究规模居世界前列, 并且仍呈现出以较快速度增长的态势; 其三, 从我国学者论文被引情况来看, 我国的研究工作扎实程度不够, 论文质量不高, 科研水平与我国当前的科研规模不相符合; 其四, 我国在可再生能源的少数分支领域, 如地热能、生物质能的研究工作还需要加大力度展开。

7.3 研究内容与科学问题

可再生能源转换利用的研究领域涉及面广, 学科交叉性强, 研究问题比较复杂。在工程热物理学科范畴内, 应着重研究的内容包括各种可再生能源转换利用过程机理以及有关的热物理问题。

7.3.1 太阳能

太阳能转换利用研究内容主要是:针对太阳能规模化利用所面临的能量转换及传递过程各个环节所需的新设备、新循环、新工艺、新材料等方面涉及的基础科学问题进行研究,结合应用技术的开发,不断提高太阳能转换利用效率;应该进一步丰富和发展太阳能转换利用研究体系,特别是将热力学、热经济学和强化传热学的思想深入贯彻到太阳能转化利用现象的分析中,解决太阳辐射-热、电、冷等转换过程中涉及的光伏效应热力学、能量转换、蓄存和传递等过程的强化及控制问题,为实现能源结构多元化,提高太阳能利用程度和水平发挥积极作用。

太阳能转换利用中的重点研究领域和科学问题包括:

1) 规模化太阳能光热利用的基础问题

重点研究太阳能光热转换规模化利用过程中出现的新问题、新现象等,如辐射条件下复杂太阳能集热器阵列汽阻问题,太阳能热能高效低、中、高温蓄存转换,太阳能采暖与强化自然通风结构的能量传递优化等;研究中高温集热器技术,特别是能够用于热化学和热发电以及聚光照明过程的聚焦太阳能集热技术研究等;研究解决太阳辐射存在间歇性造成的能量利用系统运转波动性问题,解决能量系统中太阳能与其他能源的耦合匹配问题,基于太阳能利用分数最大化的热力学和能量利用系统优化问题等。

2) 太阳能发电系统特性及其运行优化

太阳能热发电涉及太阳能聚能、吸收、储存以及与热发发电机相互联系的热媒体流动与换热等多个方面。近期主要重点研究以下方面:

(1) 太阳能聚集方式的新理论与新方法,包括:高聚光比高效率的非成像太阳能聚集机理、聚光场与接收面间能流高效传输的动态分配理论模型;聚光器运行姿态的精确测量方法,建立聚光器跟踪系统的自主纠偏机制。

(2) 高效热能吸收过程与材料研究,包括:吸热表面能流均匀化机理,设计与之相适应的吸热结构;太阳能吸热器的水力热力不稳定特性;吸热过程单相和相变工质的强化传热和温度控制原理;吸热表面热应力分布规律及其运行安全可靠;吸热器动态模型与吸热器运行的实时控制;柔性高反射材料,高温选择性吸收材料;轻质高强聚光器用高分子复合薄膜设计及复合结构模拟;有机-无机纳米复合效应、高分子复合薄膜耐候机制;透明高分子复合薄膜的多尺度结构与聚光器环境适应性的关联规律;干涉滤波型涂层;体吸收型涂层;表面涂黑型涂层;凸凹表面型涂层。

(3) 高温蓄热过程、蓄热介质与高温材料,包括:蓄热系统在长期循环高热载荷和循环交变热应力工况下化学及力学稳定性;变物性传热及蓄热介质管内流

动传热规律与强化机理；表面和界面区粒子传递现象、微观相界面瞬态变化规律；多尺度结构中传热及蓄热介质的多相耦合传递机理；强化蓄热过程传热传质机理与方法；多孔介质内部传递现象和微弱效应的准确实验技术和测试手段；以液态/固体蓄热介质为高温热源的超临界水产生机理与技术，多孔蓄热材料微结构形成规律与控制原理；液态蓄热介质流动传热规律与强化机理；固体蓄热介质相关的流动传热规律与强化机理；低成本蓄热材料，高温相变传热蓄热材料体系构建规律与相界面效应；传热蓄热材料热物性计算与测试方法；适合于高温空气发电系统，满足大密封面积、可耐受 1600℃，承受压力 2MPa 以上的密封材料，从材料设计、制备方法、工程化实现等方面开展研究。

(4) 新型传热工质、新热功转换工质与热力循环，包括：低成本油品制备方法；低腐蚀性、宽使用温度熔融盐工质制备；低沸点工质，尤其是有机工质制备与性能评价；多发电工质组合热力循环；宽使用温度传热工质，如铅-铋共晶 (LBE) 合金应用于太阳能热发电系统适应性；新型熔融盐材料设计与制备；离子液体；磁流变导热油、磁流变熔融盐强化传热机理；太阳能热发电用高效热-功转换机械的热力学原理与设计技术，规模化太阳能热发电系统节水型热力循环；冷却水再利用的复合热力循环和太阳能空气多级预热新型燃气轮机布雷顿热力循环；适合于非稳态光-热-功能量转化系统的新型工质和新型动力循环。

在光伏发电研究方面，光伏电池材料和工艺问题属交叉学科，需要与半导体、材料等领域交叉攻关，需要重点解决极端温度条件下的光伏系统工作可靠性、基于半导体和光伏效应热力学系统优化问题、光伏系统的发电和集热效应综合利用问题等、聚焦光伏热特性与强化散热问题；研究太阳能聚光光能的转化利用，如太阳能光伏发电（聚光太阳能电池）能量转化中涉及的散热问题、聚光太阳能的热吸收问题。

探讨太阳池发电技术的使用条件、可行性等，研究太阳能温差发电技术，不断提高发电效率，降低发电成本。

3) 太阳能海水淡化系统与传递过程强化

主要研究太阳能热方法实现海水淡化的途径，不断提高海水淡化装置的产水率和能源利用效率，特别是与中低温太阳能集热装置结合的海水淡化方法，解决其中的能量回收、水分回收和盐分回收等问题；以热质传递过程强化为重要手段，改进多效闪蒸、多效蒸馏以及有辅助能源情况下的复合淡化系统等的性能。开展海水淡化系统热浓盐水排入大水体中的掺混、扩散和输移的全场流动及其混合规律和机理，为减小热浓盐水排海对海洋环境的负面影响、提高海水淡化综合效率提供可靠的理论依据，使太阳能海水淡化、水质净化技术在资源环境可持续发展中发挥更大的作用。

4) 太阳能空调制冷的能量匹配、优化与动态特性

利用太阳能制冷技术季节匹配性好的特点, 结合太阳能热水系统规模化利用的趋势, 重点研究如下方面: ① 低温位热能驱动的太阳能制冷循环, 特别是能与常规太阳能集热器结合使用的制冷系统; ② 从能源结构多元化角度出发, 研究有辅助能源的各类太阳能制冷空调系统, 以太阳能利用分数最大化为目标, 考虑太阳辐射的波动性, 解决不同能源结构之间的耦合匹配问题; ③ 从能源利用最优化角度出发, 研究新型适用太阳能高效集热装置, 进行高效太阳能制冷系统研究; ④ 太阳能变热源驱动系统的动态特性与传递过程强化研究; ⑤ 太阳能热能/冷能长期蓄存材料与循环特性^[28]。

5) 太阳能-氢能转化过程的热物理问题

此类问题包括太阳能电解制氢、光解制氢和热分解制氢等, 重点研究解决太阳能光解制氢中的太阳能全波段利用问题、关键催化剂的研制与筛选、太阳能制氢和储氢过程中的热物理问题等。

6) 太阳光能的高效收集与传递

重点研究太阳能聚光系统, 进行光学创新设计, 获得较高的聚光效率, 实现低密度太阳能向高密度太阳能的转化(聚焦比达到千倍); 研究聚光太阳能的传递, 尤其是光导纤维的传递特性。

7) 碟式太阳能与生物燃气互补的热电联供系统

太阳能-生物燃气互补的热电联供系统能够解决单一太阳能供应及输出不稳定等问题, 实现更充分、高效、稳定的综合能源利用。重点研究内容包括: 生物燃气-太阳能混合热源输入系统的优化方法及理论模型; 高温热管式集热头在混合热源条件下的内部热/质传输机理; 斯特林机内部能量传递、转换机理及热力学性能精确预测模型; 热电输出分配对系统能量转换效率的影响机理。在此基础上深刻揭示以生物燃气为主、太阳能为辅的、混合热源斯特林机热电联供系统中能量传递及转换机理, 建立符合能源梯级利用原则的混合热源输入、热电输出系统优化方法及理论模型, 为形成生物燃气-太阳能联合驱动的热电联供系统提供理论依据, 为向实用化发展提供关键技术支撑。

7.3.2 生物质能

生物质热化学转化方面应开展高效生物质热解液化和生物质气化发电、城市废弃物无害化能源化利用等研究; 生物化学转化方面应开展高效厌氧发酵技术和代谢调控机制及生物制氢反应器研究, 以及进一步开展生物质高热值气化和气化制氢、生物质催化液化和超临界液化、生物质燃气净化合成和燃油精制、纤维素乙醇转化关键技术、生物质高效低成本转化新方法研究。同时结合热化学与生物

化学的耦合优势,开展生物质能量迁移优化的交叉集成研究^[29]。

生物质能转换利用中的重点研究领域和科学问题包括:

1) 生物质热解液化机理及过程强化

开展生物质热解机理研究(包括生物质热解过程机理和热解动力学模型研究);研究生物质快速热解装置内的热化学反应机理及特性、热质传输规律及对生物质热解性能的影响,建立复杂热化学反应体系热质传输及快速热解过程的理论模型;研究含不凝性气体的多组分热裂解汽态生物油快速凝结换热特性及强化传热技术;依据基础研究成果,开发高效生物质快速热解液化技术及装置。在生物油改质及品位提升方面,应开展生物质油精制新技术机理、反应动力学、重整器内流动及传输规律等基础研究^[30],以及开展生物油制氢新方法研究。

2) 生物质先进气化技术及高效气化装置和系统

研究生物质气化反应器内气化反应机理、气化反应动力学、热质传输规律、气化剂与催化剂类型及对气化过程影响,研制高效的气化反应器并建立相应的反应-传输理论模型,研究生物质催化气化和焦油催化裂解的反应机理和传热传质规律;在此基础上,开发中热值和联合气化高效气化器以及生物质气化制氢技术研究,发展高热值气化技术;开展生物质整体气化联合循环(BIGCC)、生物质能的多联产(热、电、冷、燃料)、生物质气化-燃料电池技术研究^[31];开展高效生物质气化、气体净化、合成液体燃料的基础研究^[32]。

3) 城市废弃物无害化能源化利用的基础研究

开展城市废弃物直接焚烧、热解、气化、厌氧消化等处理过程机理研究(包括反应动力学、热质传输规律、流动过程、厌氧消化的高效菌群构建及其生化反应特性等);研究废弃物转化过程中的有机污染物形成与控制规律;发展低污染排放的城市废弃物能源化利用技术与理论。

4) 生物发酵与生物制氢过程中生化反应和热物理基础

开展生物发酵与生物制氢过程中微观热质传递、生物转化中的代谢途径及代谢调控机制、高效产氢和产乙醇菌群的构建、能量和物质转换机理及规律研究;开展生化反应器内生化反应动力学及反应过程多尺度耦合机理、多相流动、热质传输规律以及含生化反应的复杂结构材料内多元多相流动与传输特性的研究工作;开展生物能源转化中固定化细胞技术应用的研究。结合现代生物工程技术筛选能高效处理生物质的优良菌种,提高菌种的产物转化率和光能利用效率,开发藻类通过光合作用分解水生产氢能的技术,研制高效生物制氢反应器。

5) 微藻生物质能源利用的基础研究

开展微藻培养的光生物反应器内光能传递、多相多组分流动及传输、二氧化碳固定、生化转化机理和微藻生长特性、微藻采收及分离理论和方法、微藻生物

质能源转化及利用机理及特性、微藻能源利用系统集成优化及控制理论等方面的研究工作。

6) 生物质酯化转化机理与热物理基础

针对我国生物柴油技术发展快,但基础研究薄弱的事实,开展生物质酯化转化机理与热物理基础研究。重点研究内容包括:酯化反应过程的热质传递机理及其对催化反应动力学的影响机制;生物柴油集成工艺中的能源输配理论与调控;生物柴油副产物的高效利用;固定化酶/固定化细胞催化酯化过程中的催化剂中毒失活机理与抑制;生物柴油高值化为航空煤油的转化机理与工艺控制;生物柴油反应器优化设计。

7.3.3 风能

近期风能利用方面的研究应以大型风力发电机和海上风力发电的基础理论与应用技术研究为主,逐步加强对风能气象学及大气边界层风特性、局部风场预测和检测技术等方面的研究;开展深海悬浮式新型风力发电机组的基础理论探索;中期应开展风力发电机组储能技术和风能-氢能、风能-太阳能等多能互补综合利用系统的研究,同时开展对风能在海水淡化、制热和制冷等领域的应用研究。

1) 兆瓦级变速恒频型风力机的基础理论

空气动力学问题主要包括:非定常气动力研究及气动结构优化理论和设计方法;复杂来流及其极限条件下的叶片气动力学理论;地面及塔架效应对风力机气动影响;叶片尾迹流及其风力机阵列的优化组合;自然环境(雨、雪、雹、风暴)对风力机运行的影响及适应复杂环境的风力机运行与控制策略;非定常风沙动力学与叶片磨损机理等。

三维气动与弹性联合设计理论与方法主要包括:三维叶片气动设计理论与方法,考虑叶片弹性气动弹性耦合设计理论与方法、经验参数的选取等;研究叶片和机组气动弹性稳定性特征方程和判据准则等。

极端载荷问题主要包括风力机运行过程动态模拟研究、随机载荷分析、交变应力分析、可靠性设计、叶片疲劳分析以及寿命评估理论。

2) 近海风力发电的基础理论

相对于陆上风力机而言,海上风力机受波浪和风的双重作用,在疲劳载荷和极端载荷分析中必须考虑波力和风力的联合作用,应研究风、波浪和潮汐联合作用下的空气动力学与水动力学问题。

海上风力机基础结构设计理论问题主要包括基础结构形式研究和各种基础结构在波力和风力的联合作用下风力机的结构动力学特性研究。

3) 风能气象学及百米高度风资源评估与微观选址

基于中长期的数据监测及数学统计方法,获得我国 70 ~ 100m 高度风资源及其分布;研究陆地与海面大气边界层的风特性,特别是陆地复杂地形下风电场和风轮周边局部风场和风特性的预测模型与测量技术以及极端气候条件下风力机安全评估方法;基于确定性和非确定性数值模拟方法,研究不同地域、复杂地貌条件下风电场的微观选址,规模化风电场的微观选址、风电场出力预报理论和方法。

4) 中、远海上风能利用中的关键科学问题

由于中、远海风能资源巨大,远海风能利用是人类未来必然的选择。开展适合于中、远海上风能利用新模式研究及悬浮式风电机组与波浪能发电、潮汐能发电或洋流能发电等综合能源利用装置的研究,揭示多种海洋能源形式之间的耦合机理,研究这类机组的动态特性与稳定性。

5) 风力发电机新型储能系统

研究适用于风能利用的蓄水储能、超导储能、压缩空气储能、风能制氢储氢等储能方法,揭示风力机与相关储能设备的变工况特性及相互之间的匹配机理,研究相关储能装置的风能利用特性及能源转换原理。

6) 新型风能转换系统和多能互补综合利用系统

研究新型的风力制热和制冷技术、风能海水淡化以及风能与太阳能等其他新能源、风能与化石能源等多能互补综合利用系统技术。

我国风能利用方面的基础研究工作还很薄弱,缺乏系统性,一些重要的基础性研究工作亟待开展。建议近期采用面上项目资助形式,推动各方向研究工作的开展。同时,以海上风力发电或大型风力发电机组基础研究为方向,结合力学、大气科学、海洋科学、机械科学、电工科学、材料科学、自动化科学等多个学科的研究力量,以基金重点项目形式资助开展多学科交叉的风能利用基础研究,以期在风能利用前沿研究领域某一方向形成突破,以点带面,为我国风能事业的发展奠定基础。

7.3.4 地热能

地热能利用的研究近期应以地热热泵系统理论和应用技术研究为主,加强地热利用过程中含湿岩土传热传质特性、换热器抗垢和强化传热研究;进一步发展和完善地热发电站系统,研究地热能源在各适用领域中的综合利用方法等。鉴于地源蓄热体和建筑物采暖空调与地域特征紧密相关,必须深入开展地源蓄热特性与热泵年运行热输入和热取出的能量平衡问题研究,并考虑地源、太阳能热源和空气热源等的有机结合问题。

地热能的主要热科学问题包括:

(1) 地源低温热利用,即以土壤作为蓄热体的地源热泵运行特性与气候特性及其土壤传热传质特性之间的能源系统热耦合。

(2) 对于 100℃ 以上的地热,需要研究有机朗肯循环热机发电或热工转换问题;对于 200℃ 以上的地热则需要研究太阳能与地热结合的高效热功转换系统。

深层地热是近年研究的热点,应重点进行研究,主要的基础科学问题包括:

(1) 增强型地热资源的评估模型、地质特性、热特性、可用性评估研究。

(2) 热储层的三维动态模型、激发预测模型、高效动态检测机理研究。

(3) 载热介质传热机理、新型发电技术、高效发电工质、资源梯级综合利用模型研究。

7.3.5 海洋能

海洋能利用近期应重点以潮流能、波浪能等获能装置基础理论研究与应用技术研究为主,研究获能装置同动力源之间耦合作用机理、水轮机流-固耦合的动力学分析和性能预测方法、水轮机翼型优化与翼型族技术,尽可能实现高效率获能;结合应用研究解决大规模潮汐电站关键问题;加强对温差能综合利用系统的研究。中、长期可以考虑开展规模化、实用化海洋能发电系统研究,同时开展以海洋能多能互补为主、风能、太阳能为辅,包含海水淡化、制氢等领域综合利用研究。必须强调,海洋能的利用和能源、海洋、国防和国土开发都紧密相关,应当从发展和全局的观点来考虑。

海洋能转换利用中重点研究领域和科学问题包括:

1) 潮汐能

主要包括:大型潮汐电站水轮发电机组的设计、制造及优化运行控制技术;低水头、大流量、高性能、双向六工况运行的大型全贯流式机组研制、开发,适应潮流不稳定特性的优化运行策略与运行控制系统开发;潮汐(流)能工程综合试验、测试和评估方法与标准的研究。

2) 潮流能

研究内容包括潮流能水轮机叶片同潮流流动之间复杂多变的非定常耦合关系,各种形式潮流能水轮机水动力机理与性能研究,复杂潮流能来流条件下翼型水动力性能优化设计与叶片翼型系列开发研究,水轮机尾迹流及其水轮机阵列的优化组合,潮流能发电装置及海上支撑结构长期运行时风、浪、流联合载荷作用下的动力响应机理与安全评估理论与方法等。

3) 波浪能

研究内容包括大中型岸式振荡水柱波能发电装置设计及优化运行技术、离岸

式波能发电装置的设计等。

4) 温差能

在海洋温差能深层冷海水输运原理和技术方面,研究海洋温差能系统海底管道及悬浮式管道的流体输运和保温原理和技术;南海海域风浪条件下悬浮式管道保温和管道抗风浪安全保障技术;冷海水管道与温差能系统有效匹配技术。

在海洋温差能热力循环系统研究方面,研究适用于小温差热源系统的非共沸工质高效海洋温差能热力循环原理和技术;非共沸工质海洋温差范围内运行工况点热物性;海洋温差动力系统液体升膜欠热蒸发传热技术及装置;适用于热媒变温换热条件下工质的欠热蒸发技术;换热装置热媒侧边界层流态重整强化传热技术;高传热系数、低阻力损失换热器技术;换热器海洋防生物附着技术。

在海洋温差能系统用氨透平研究方面,进行高效氨透平研究;发展氨透平零泄漏磁流体及磁流体密封原理和技术;研究涡旋膨胀中速透平工作原理。

7.4 近期优先领域和重点支持方向

7.4.1 太阳能

太阳能转换利用研究具有多学科交叉的特点,特别与材料科学、半导体物理、光学工程、化学工程等学科领域的研究进展密不可分。对太阳能转换利用研究方向的资助,应更注重多学科研究力量的交叉协作,涉及的优先基础领域有:

1) 太阳能利用与建筑节能

各类建筑物是利用太阳能的良好载体,包括采暖、采光、热水、空调、强化自然通风以及电力供应乃至利用光催化降解有机物改善室内环境,进行水质净化等,通过充分合理利用太阳能资源可以实现大幅度建筑节能,关键需要建筑学、建筑结构与环境包括太阳能科技工作者共同攻关,研究结合的最优形式和最佳的利用方式,有利于收集、蓄存太阳能的建筑材料与建筑结构等。

2) 太阳-植物光合作用

占据地球利用太阳能所有形式中的最大份额,是生物质能生产的关键,需要农业生物领域等有关科技人员共同攻关,揭示和利用光合作用原理研究开发新的太阳能利用器件等。

3) 新型太阳能电池

在半导体物理、光学工程、材料以及太阳能利用等领域科技人员共同攻关,不断提高太阳能电池转换效率,降低成本,运用热力学原理揭示光电效应中的物理现象。

4) 风、水、光电互补系统设计、运行与控制

结合风电、水电和太阳能发电资源,因地制宜提出合理的配置方法;结合电网研究风、水、光互补系统的特性,提出优化的运行与控制方法。充分发挥三种能源的优势,克服太阳能和风能资源的间歇性和不稳定,水力发电在枯水季节满足供应不足的问题。实现风能、水能、太阳能的绿色能源互补,可再生能源最大化利用和能源系统的稳定运行。

5) 太阳能利用与环境保护及温室气体减排

无论是海水淡化、水质净化还是光催化降解有机物进行污水处理以及空气净化等都不仅仅是太阳能领域的工作,更多的是需要环境化工领域的科技工作者共同参与。

6) 多能互补网络能源系统

可再生能源等较为分散,各类互补能源间往往有一定地理距离,需要形成网络化的互补系统,构建多层次、多种能量互补流动、可自愈和重构的系统网络拓扑;并研究大扰动、严重故障等情况下系统自愈恢复策略;研究可再生能源发电过低或停运时,主要供电源转移的网络重构条件和策略。

建议近期资助方向有:

- (1) 基于太阳能光电、光热效应的系统热力学分析及最优化理论;
- (2) 聚能式高效太阳能转化利用关键问题;
- (3) 基于建筑结构的太阳能高效收集与蓄存的模式、材料及有关传热问题。
- (4) 高效太阳能海水淡化方法及产水与能量过程优化;
- (5) 新型高效太阳能电池制备与加工中的热物理问题;
- (6) 太阳辐射-制冷效应转换过程优化与分析;
- (7) 太阳能制氢-储氢以及转换过程中的热物理问题;
- (8) 多能源供应体系下的能量利用系统中太阳能转换利用及其最优化;
- (9) 太阳能利用及蓄存新原理、新器件、新方法、新材料和新工艺;
- (10) 太阳能海水淡化系统热浓盐水排放的热-流动扩散机理研究;
- (11) 多能互补能源网络运行规律与控制。

7.4.2 生物质能

生物质能转化利用主要涉及热化学转化与生物化学转化,具有多学科交叉的特点,资助重点应在于生物质能利用中的工程热物理问题研究上,而热物理问题研究又有赖于交叉学科领域如物理化学、生物化学、化学工程、微生物学、生物工程和环境科学等学科的研究及发展^[33]。因此,生物质能利用研究方向的资助应更注重交叉学科领域研究力量的协作。

微生物厌氧发酵和制氢技术以及微藻能源技术,是开发可再生清洁能源重要的生物能源技术,具有极其广阔的发展前景。微生物厌氧发酵和制氢及微藻能源技术中的生化反应器存在很多生化反应动力学和热质传输等关键的热物理问题,建议加大对该领域研究工作的资助力度,推动我国生物能源和生态环境技术的发展。

此外,目前生物质热解、气化、燃烧、发酵、酯化等单一技术,难以从能量与物质角度实现生物质的充分转化利用。应该集成两种转化途径的优势进行耦合,实现生物质能量与物质的优化迁移并兼顾环境友好性。因此,建议加大生物质的热化学转化与生物化学转化的交叉集成研究。

建议近期资助方向有:

- (1) 高效生物质热解液化技术及基础理论;
- (2) 生物质高效气化器基础及先进气化技术;
- (3) 城市废弃物无害化能源化利用;
- (4) 高效厌氧消化反应器生化反应动力学及相关热物理问题;
- (5) 生物制氢过程生化反应动力学及相关热物理问题;
- (6) 微藻固碳及能源化利用中的热物理问题;
- (7) 生物质催化液化和超临界液化;
- (8) 生物质高质液体燃料制备技术及相关基础;
- (9) 生物质气化合成;
- (10) 生物质燃料乙醇制备相关基础;
- (11) 生物质酯化转化技术及相关热物理问题;
- (12) 生物质的热化学转化与生物化学转化的耦合集成等生物质高效低成本转化新方法 & 机理。

7.4.3 风能

风能利用的研究近期应以大型风力发电机和海上风力发电机基础理论研究和应用技术研究为主,逐步加强对风能气象学及风特性、湍流和阵风、局部风场预测和检测等方面的研究。近期资助方向为:

- (1) 结合我国气候特点的新型风电叶片大型风力机的基础理论;
- (2) 波浪、潮汐作用下的近海风力机多体动力学基础理论及海上悬浮式风力机;
- (3) 风能气象学与微观选址;
- (4) 风力发电机新型储能系统;
- (5) 新型风能系统和风能多能源综合利用系统。

7.4.4 地热能

地热能近期重点资助研究领域和交叉领域包括:

- (1) 中低温地热资源先进开采技术中的传热传质问题;
- (2) 回灌开采利用模式中的关键技术及其机理问题;
- (3) 高效率、高可靠性、长寿命地热流体发电系统;
- (4) 基于地热资源利用的含湿岩土传热传质学研究;
- (5) 地热能利用中的地热热储及岩土动力学问题;
- (6) 地热能利用过程中的材料防腐蚀、结垢问题等。

7.4.5 海洋能

海洋能建议资助研究领域和交叉领域包括:

- (1) 大型潮汐电站水电机组设计技术;
- (2) 适合于低流速的新型潮流能获能装置开发与水动力学机理、性能研究;
- (3) 潮流复杂流动下水轮机翼型优化设计与翼型系列开发研究;
- (4) 波浪能开发利用中的水动力学、空气动力学问题;
- (5) 海洋温差热力转换与海水淡化;
- (6) 海洋能利用中的海洋工程问题和多能互补问题;
- (7) 浓差能转换原理与材料。

参 考 文 献

- [1] Aitken D W. 走向拥有更多可再生能源的未来//国际太阳能协会白皮书. <http://whitepaper.ises.org>, 2004. [2010-10-20].
- [2] 严陆光, 崔容强. 21 世纪太阳能新技术//2003 年中国太阳能学会学术年会论文集. 上海: 上海交通大学出版社, 2003: 103.
- [3] Peter M. Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies. Bioresource Technology, 2002, (83): 47—54.
- [4] Tempel J, Molenaar D P. Wind turbine structural dynamics -A review of the principles for modern power generation, onshore and offshore. Wind Engineering, 2002, (26): 211—220.
- [5] Griffin D A. Current research and development efforts for large wind turbine blades. International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings), 2003, (48): 2639—2652.
- [6] Enrico B. Geothermal energy technology and current status: An overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2002, 6(1-2): 3—65.
- [7] Pelc R, Fujita R M. Renewable energy from the sea. Marine Policy, 2002, (26): 471—479.

- [8] European Renewable Energy Council (EREC). Renewable Energy Technology Roadmap 20% by 2020, 2008: 11.
- [9] U. S. Department of Energy, Solar Energy Technologies Program, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Multi Year Program Plan 2008 — 2012, 2008: 22.
- [10] Goswami D Y, Vijayaraghavan S, Lu S, et al. New and emerging developments in solar energy. *Solar Energy*, 2004, 76(1-3): 33 — 43.
- [11] Kalogirou S A. Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, (30): 231 — 295.
- [12] Mills D. Advances in solar thermal electricity technology. *Solar Energy*, 2004, (76): 19 — 31.
- [13] Greenpeace International, IEA SolarPACES, ESTELA, Global Concentrating Solar Power Outlook 2009, 2009: 8.
- [14] Kodama T. High temperature solar chemistry for converting solar heat to chemical fuels. *Progress in energy and combustion science*, 2003, (29): 567 — 597.
- [15] Amouyal E. Photochemical production of hydrogen and oxygen from water: A review and state of the art. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1995, (38): 249 — 276.
- [16] Florides G A, Tassou S A, Kalogirou S A. Review of solar cooling and low energy cooling technologies for buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2002, (6), 557 — 572.
- [17] 王如竹, 代彦军. 太阳能制冷. 北京: 化学工业出版社, 2007: 75.
- [18] Dieng A O, Wang R Z. Literature review on solar adsorption technologies for ice-making and air-conditioning purposes and recent developments in solar technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2001, 5(4): 313 — 342.
- [19] Tiwari G N, Singh H N, Tripathy R. Present status of solar distillation. *Solar Energy*, 2003, (75): 367 — 373.
- [20] Matti P. Global biomass fuel resources. *Biomass and Bioenergy*, 2004, (27): 613 — 620.
- [21] Franco G N. Perspectives for the use of biomass as fuel in combined cycle power plants. *International Journal of Thermal Sciences*, 2005, (44): 163 — 177.
- [22] Dennis Y C L, Yin X L, Wu C Z. A review on the development and commercialization of biomass gasification technologies in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2004, (8): 565 — 580.
- [23] Ida A, Marcel J, Jorge R. Photobiological hydrogen production: Photochemical efficiency and bioreactor design. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2002, (27): 1195 — 1208.
- [24] Sahin A D. Progress and recent trends in wind energy. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, (30): 501 — 543.
- [25] Singh S, Bhatti T S, Kothari D P. Aspects of technological development of wind turbines. *Journal of Energy Engineering*, 2003, (129): 81 — 95.

- [26] Lund J W. World status of geothermal energy use Overview, <http://geoheat.oit.edu/pdf/pdfindex.htm>.
- [27] Adam W. Ocean power: Wave and tidal energy review. *Refocus*, 2004, 5(5): 50 — 55.
- [28] IEA, Renewables for heating and cooling Untapped Potential, 2007: 31 — 42.
- [29] IEA in support of the G8 Plan of Action, Towards a Sustainable Energy Future IEA programme of work on climate change, clean energy and sustainable development, 2008: 7 — 15.
- [30] Solomon B D, Barnes J R, Halvorsen K E. Grain and cellulosic ethanol: History, economics, and energy policy. *Biomass and Bioenergy*, 2007, 31: 416 — 425.
- [31] Goyal H B, Seal D, Saxena R C. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12: 504 — 517.
- [32] Khan A A, Jong W D, Jansens P J, et al. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*, 2009, 90: 21 — 50.
- [33] Saxena R C, Adhikari D K, Goyal H B. Biomass-based energy fuel through biochemical routes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13: 167 — 178.

附录 1 工程热物理与能源利用学科资助重点项目一览表 (2001 ~ 2010 年)

序号	项目批准号	学科代码	项目名称	依托单位	起止年月	资助金额/万元
1	50136010	E060202	高负荷跨音风扇/压气机稳定性设计方法的综合性研究	北京航空航天大学	2002. 01 ~ 2006. 12	120
2	50136020	E0603	变尺度松散结构物质在多相化学反应条件下的内部传递行为	清华大学	2002. 01 ~ 2005. 12	130
3	50136030	E060202	叶轮机气动力学新一代反命题和优化设计的研究	上海大学	2002. 01 ~ 2005. 12	100
4	50136040	E0604	代用清洁燃料在内燃机中的燃烧特性与控制问题的研究	西安交通大学	2002. 01 ~ 2005. 12	150
5	50236010	E0603	先进质子交换膜燃料电池热物理关键问题研究	北京工业大学	2003. 01 ~ 2006. 12	150
6	50236020	E060202	压气机通流部分几何变形对流场结构影响及其性能优化	哈尔滨工业大学	2003. 01 ~ 2006. 12	170
7	50236030	E060504	气固两相端流拟序结构的直接数值模拟和实验研究	浙江大学	2003. 01 ~ 2006. 12	120
8	50336010	E060302	特殊环境下的流动、传热、传质研究	哈尔滨工业大学	2004. 01 ~ 2007. 12	230
9	50336020	E060601	流体热物性自动测试技术及推算新方法的研究	西安交通大学	2004. 01 ~ 2007. 12	115
10	50336030	E0604	新型脉冲爆震燃烧方式的应用基础研究	西北工业大学	2004. 01 ~ 2007. 12	135
11	50336040	E0605	化合物半导体晶体生长与缺陷控制的热物理问题	西北工业大学	2004. 01 ~ 2007. 12	150
12	50336050	E060202	轴流式叶轮机械非轴对称非定常流动机理的实验和理论研究	中国科学院工程热物理研究所	2004. 01 ~ 2007. 12	150
13	50436010	E0608	机电表面功能结构及相关热物理问题的基础研究	华南理工大学	2005. 01 ~ 2007. 12	150
14	50436020	E060305	功能流体流动和传热特性及其控制方法研究	南京理工大学	2005. 01 ~ 2008. 12	150
15	50436030	E0603	临床肿瘤冷热处理过程中的热物理问题研究	上海交通大学	2005. 01 ~ 2008. 12	200
16	50436040	E0608	室内有机化学和微生物污染去除新方法关键机理问题研究	清华大学	2005. 01 ~ 2008. 12	150

续表

序号	项目批准号	学科代码	项目名称	依托单位	起止年月	资助金额/万元
17	50536010	E060305	微/纳尺度条件下的流体流动与传热传质研究	上海交通大学	2006.01 ~ 2009.12	180
18	50536020	E0605	多相流相界面非线性动力学形变与数值模拟	西安交通大学	2006.01 ~ 2009.12	180
19	50536030	E060408	多参数耦合的火灾动力学演化与突变研究	中国科学技术大学	2006.01 ~ 2009.12	180
20	50536040	E060105	高效热驱动热声制冷技术中的关键热科学问题研究	中国科学院理化技术研究所	2006.01 ~ 2009.12	180
21	50636010	E060605	火焰多波段热辐射图像分析及热物理量场重建 燃烧诊断	华中科技大学	2007.01 ~ 2010.12	180
22	50636020	E0601	非均匀和非平衡体系的工质气液表面张力与动力学特性	清华大学	2007.01 ~ 2010.12	120
23	50636030	E0603	界面与结构效应引起的微细传递现象和机理	清华大学	2007.01 ~ 2010.12	190
24	50636040	E060405	先进内燃机燃烧与控制理论中的若干关键问题研究	天津大学	2007.01 ~ 2010.12	280
25	50636050	E0603	传热与流动问题多尺度、跨尺度数值模拟及实验研究	西安交通大学	2007.01 ~ 2010.12	190
26	50730006	E060305	微纳米尺度流动与传热学	清华大学	2008.01 ~ 2011.12	180
27	50736001	E0605	致密多孔介质内超临界 CO ₂ 、水及原油输运特性的基础研究	大连理工大学	2008.01 ~ 2011.12	180
28	50736002	E0606	融合热物理信息的多机理层析成像研究	华北电力大学	2008.01 ~ 2011.12	180
29	50736003	E0603	极高热流密度表面热防护中的关键热传递问题研究	清华大学	2008.01 ~ 2011.12	180
30	50736004	E060105	低品位余热高效利用的多效双重吸附制冷研究	上海交通大学	2008.01 ~ 2011.12	190
31	50736005	E0607	太阳能的分频利用和热发电中的热物理基础科学问题研究	西安交通大学	2008.01 ~ 2011.12	190
32	50736006	E0604	气固两相湍流与燃烧相互作用的直接数值模拟和实验研究	浙江大学	2008.01 ~ 2011.12	190
33	50736007	E0602	风扇/压气机非定常流动的控制途径基础研究	中国科学院工程热物理研究所	2008.01 ~ 2011.12	220

续表

序号	项目批准号	学科代码	项目名称	依托单位	起止年月	资助金额/万元
34	50836001	E0608	高导热/绝热介孔异质复合体及其热物理效应	北京科技大学	2009.01 ~ 2012.12	200
35	50836002	E060305	微结构辐射特性及其调控机理	哈尔滨工业大学	2009.01 ~ 2012.12	185
36	50836003	E060603	气固两相流场多参数在线测量方法研究	上海理工大学	2009.01 ~ 2012.12	200
37	50836004	E060601	流体热物性测试新方法及其应用研究	西安交通大学	2009.01 ~ 2012.12	185
38	50836005	E0608	太阳能与化石能源互补的多功能系统集成研究	中国科学院工程热物理研究所	2009.01 ~ 2012.12	220
39	50836006	E060703	大型风电叶片风能吸收机理及气弹稳定性若干基础问题的研究	中国科学院工程热物理研究所	2009.01 ~ 2012.12	200
40	50836007	E0603	影响电弧加热发动机寿命和效率的关键热物理问题研究	中国科学院力学研究所	2009.01 ~ 2012.12	210
41	50930004	E0607	太阳能热电-光电复合发电技术及其关键材料的基础研究	武汉理工大学	2010.01 ~ 2013.12	200
42	50930006	E060702	生物质热解多联产过程机理与产物调控机制研究	华中科技大学	2010.01 ~ 2013.12	200
43	50930007	E060701	太阳能聚集、高温热转换与蓄热的关键热科学问题研究	哈尔滨工业大学	2010.01 ~ 2013.12	200
44	50936001	E0604	实现氧燃烧富集 CO ₂ 的新理念与新方法	华中科技大学	2010.01 ~ 2013.12	200
45	50936002	E060305	多因素耦合作用下微/纳尺度热辐射特性及传输机理研究	南京理工大学	2010.01 ~ 2013.12	210
46	50936003	E0608	受控脉冲穿孔等离子弧焊接熔池动态传热特性	山东大学	2010.01 ~ 2013.12	200
47	50936004	E060405	压燃式发动机高效低温燃烧的基础研究	上海交通大学	2010.01 ~ 2013.12	200
48	50936005	E0604	湍流液雾两相流燃烧大涡模拟的研究	中国科学技术大学	2010.01 ~ 2013.12	190
49	50936006	E0607	磁约束热核聚变反应堆能量转化部件中关键工程热物理问题研究	中国科学院研究生院	2010.01 ~ 2013.12	200
50	51036001	E0608	建筑热湿解耦环境控制原理及方法研究	东南大学	2011.01 ~ 2014.12	230

续表

序号	项目批准号	学科代码	项目名称	依托单位	起止年月	资助金额/万元
51	51036002	E060106	热力发电系统节能与优化控制基础研究	华北电力大学	2011.01~2014.12	240
52	51036003	E0603	先进传热强化理论及机理研究	华中科技大学	2011.01~2014.12	235
53	51036004	E060405	缸内直喷汽油机高效清洁燃烧关键科学问题的研究	清华大学	2011.01~2014.12	244
54	51036005	E0603	电场强化汽/液/固三相接触区域相变传热研究	上海交通大学	2011.01~2014.12	220
55	51036006	E060702	生物质全组分热化学转化制取车用生物燃油的关键基础问题研究	天津大学	2011.01~2014.12	240
56	51036007	E060408	高原低压低氧特殊环境下火灾防治的热物理问题	中国科学技术大学	2011.01~2014.12	230
57	90210032	E0601	适合西部的多功能能源系统	中国科学院工程热物理研究所	2003.01~2007.12	130
58	90410017	E060403	西部煤中矿物质及特有污染组分在燃烧与转化过程中迁移变化行为	华中科技大学	2005.01~2008.12	200
59	90510020	E060706	光生物制氢中光生化转化和传输机理	重庆大学	2006.01~2009.12	150
60	90610035	E060702	西部生物质高品位液化基础研究	浙江大学	2007.01~2010.12	150
61	51027001	E060602	制冷机做冷源的液氢到室温宽温区固体材料热物性测量装置研制	中国科学院理化技术研究所	2011.01~2013.12	200
62	50122166	E0604	低排放二甲醚(DME)汽车性能优化和提高耐用性研究	西安交通大学	2002.01~2005.12	105
63	50122167	E0604	燃用生物生成乙醇混合燃料的压燃式柴油发动机研究	上海交通大学	2002.01~2005.12	105
64	U0634005	E060104	高密度储能及潜热输送材料的基础物性及传输机理研究	中国科学院广州能源研究所	2007.01~2011.12	100
65	U0934005	L04	高耗能行业换热设备的节能理论与先进制造技术研究	西安交通大学	2010.01~2013.12	170
66	U0934006	L04	分液式冷凝器的关键基础与技术基础原理探讨	广东工业大学	2010.01~2013.12	160
67	U1034004	L04	大功率LED关键热物理问题的基础研究	华北电力大学	2011.01~2014.12	190
68	U1034005	L04	热敏性物料吸附干燥技术的关键热科学问题	中山大学	2011.01~2014.12	190

附录2 工程热物理与能源利用学科 部分重要国际学术会议

1. 工程热力学

- ASME AES Conference, 每年一届
- Conference of ECOS (Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems), 每年一届
- International Refrigeration Congress, 每四年一届
- Symposium on Thermophysical Properties, 每三年一届
- International Symposium on Low Carbon Technology, 每年一届

2. 内流流体力学

- ASME-IGTI 国际会议, 每年一届
- AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 每年一届
- ISOBIE International Symposium on Air Breathing Engines, 每两年一届
- Asian Congress on Gas Turbines (ACGT2009), 每两年一届
- The International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows (ISAIF), 每两年一届

3. 传热传质学

- International Heat Transfer Conference, 每四年一届
- ASME National Heat Transfer Conference, 每四年三届, 国际传热大会当年不开
- ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 每年一届
- ASME Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer International Conference, 每两年一届
- AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, 每四年一届

4. 燃烧学

- International Symposium on Combustion, 每两年一届
- International Symposium on Fire Safety Science, 每三年一届
- SAE World Congress, 每年一届
- International Symposium on Fire Safety Science, 每三年一届
- CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology, 每三年一届
- International Conference on Liquid Atomization and Spray System, 每三年一届

5. 多相流

- International Conference on Multiphase Flow, 每三年一届
- International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, 每两年一届

6. 可再生能源

- Solar World Congress, 每两年一届
- World Renewable Energy Congress, 每两年一届
- EWEA European Wind Energy Conference & Exhibition, 每年一届

附录3 工程热物理与能源利用学科相关重要国际学术期刊列表

序号	期刊题名	ISSN	分区	索引	网址	出版者
1	<i>Aerospace</i>	0305-0831	无	SCIE EI	http://www.raes.org.uk	Royal Aeronautical Soc
2	<i>Aerospace America</i>	0740-722X	4	SCIE EI	http://www.aiaa.org/aerospace	AIAA
3	<i>Aerospace Engineering</i>	0736-2536	无	SCIE EI	http://www.sae.org/mags/aem/	SAE
4	<i>Aerospace Science and Technology</i>	1270-9638	4	SCIE EI	http://www.sciencedirect.com/science/journal/12709638	Physics and Astronomy Classification Scheme Elsevier Science Ltd
5	<i>AIAA Journal</i>	0001-1452	4	SCI EI	http://www.aiaa.org/content.cfm? pageid = 322 &lupubid = 2	AIAA
6	<i>AIChE Journal</i>	0001-1541	2	SCI EI	http://www.aiche.org/aichejournal/	AIChE
7	<i>Aircraft Engineering and Aerospace Technology</i>	1748-8842	4	SCIE EI	http://www.emeraldinsight.com/aeat.htm	MCB Univ Press Ltd
8	<i>Annual Review of Energy and the Environment</i>	1056-3466	无	SCIE EI	http://energy.annualreviews.org/	Annual Reviews Inc
9	<i>Annual Review of Fluid Mechanics</i>	0066-4189	1	SCI EI	http://www.annualreviews.org/journal/fluid	Annual Reviews Inc
10	<i>Applied Energy</i>	0306-2619	3	SCI EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/03062619	Elsevier Science Ltd
11	<i>Applied Physics Letters</i>	0003-6951	2	SCI EI	http://apl.aip.org/	American Institute of Physics
12	<i>Applied Solar Energy</i>	0003-701X	无	EI	http://www.allertonpress.com/journals/ase.htm	Allerton Press Inc

续表

序号	期刊题名	ISSN	分区	索引	网址	出版者
13	<i>Applied Thermal Engineering</i>	1359-4311	3	SCIE EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/13594311	Elsevier Science Ltd
14	<i>ASHRAE Journal</i>	0001-2491	4	SCIE EI	http://www.ashrae.org/	ASHRAE
15	<i>ASHRAE Transactions</i>	0001-2505	无	EI	http://www.ashrae.org/	USA ASHRAE
16	<i>ASME Journal of Biomechanical Engineering</i>	0148-0731	4	SCI EI	http://scitation.aip.org/ASMEJournals/Biomechanical/	ASME
17	<i>Journal of Engineering for Gas Turbines and Power</i>	0742-4795	4	SCI EI	http://scitation.aip.org/journals/doc/ASMEDL-home/jmls/top.jsp?key=JETPEZ	ASME
18	<i>Journal of Heat Transfer Transactions of the ASME</i>	0022-1481	3	SCI EI	http://www.asmeny.org/cgi-bin/WEB017C?639151+0001+00+00000+JC	ASME
19	<i>Atomization and Sprays</i>	1044-5110	4	SCI	http://www.begellhouse.com/journals/6a7c7e10642258cc.html	Begell House
20	<i>Biofuels, Bioproducts and Biorefining</i>	1932-1031	无	SCIE EI	http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/(ISSN)1932-1031	John Wiley & Sons Inc
21	<i>Biomass & Bioenergy</i>	0961-9534	2	SCIE EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/09619534	Elsevier Science Ltd
22	<i>Building and Environment</i>	0360-1323	3	SCI EI	http://www.elsevier.com/locate/buildenv	Elsevier Science Ltd
23	<i>Canadian Journal of Chemical Engineering</i>	0008-4034	4	SCI EI	http://www.cjche.ca/	Can. Soc. for Chem. Eng.
24	<i>Chemical Engineering</i>	0009-2460	4	SCI EI	http://www.mcgraw-hill.com/	McGraw-Hill Inc
25	<i>Chemical Engineering and Processing</i>	0255-2701	3	SCI EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/02552701	Elsevier Science Ltd

续表

序号	期刊题名	ISSN	分区	索引	网址	出版者
26	<i>Chemical Engineering and Technology</i>	0930-7516	3	SCI EI	http://www.wiley-vch.de/publish/en/journals/alphabeticalIndex/2044/	John Wiley & Sons Inc
27	<i>Chemical Engineering Communications</i>	0098-6445	4	SCI EI	http://www.informaworld.com/smpp/title~content=t713454788	Gordon & Breach Science Publ Inc
28	<i>Chemical Engineering Journal</i>	1385-8947	2	SCI EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/13858947	Elsevier Science Ltd
29	<i>Chemical Engineering Progress</i>	0360-7275	4	SCI EI	http://www.cepmagazine.org/	AIChE
30	<i>Chemical Engineering Research & Design</i>	0263-8762	4	SCI EI	http://www.icheme.org/publications/journals/cherd/cherd_navigation_frameset.htm	ICHEME
31	<i>Chemical Engineering Science</i>	0009-2509	2	SCI EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/00092509	Elsevier Science Ltd
32	<i>Combustion and Flame</i>	0010-2180	2	SCI EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/00102180	Elsevier Science Ltd
33	<i>Combustion Explosion and Shock Waves</i>	0010-5082	4	SCI EI	http://www.kluweronline.com/issn/0010-5082	Springer New York
34	<i>Combustion Science and Technology</i>	0010-2202	4	SCI EI	http://www.tandf.co.uk/journals/titles/00102202.html	Taylor & Francis
35	<i>Combustion Theory and Modeling</i>	1364-7830	3	SCI EI	http://www.tandf.co.uk/journals/titles/13647830.asp	Taylor & Francis
36	<i>Computers & Fluids</i>	0045-7930	3	SCI EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/00457930	Elsevier Science Ltd
37	<i>Continuum Mechanics and Thermodynamics</i>	0935-1175	4	SCI EI	http://www.link.springer-ny.com/link/service/journals/00161/index.htm	Springer Verlag Berlin Heidelberg

续表

序号	期刊题名	ISSN	分区	索引	网址	出版者
38	<i>Cryobiology</i>	0011-2240	4	SCI EI	http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/622814/description#description	Elsevier Science Ltd
39	<i>Cryogenics</i>	0011-2275	4	SCI EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/00112275	Elsevier Science Ltd
40	<i>Cryoletters</i>	0143-2044	4	SCI	http://www.cryoletters.org/	Cryoletters
41	<i>Energy</i>	0360-5442	2	SCI EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/03605442	Elsevier Science Ltd
42	<i>Energy & Environment</i>	0958-305X	无	EI	http://www.multi-science.co.uk/ee.htm	England MultiScience Publishing Co Ltd
43	<i>Energy & Environmental Science</i>	1754-5692	1	SCI EI	http://pubs.rsc.org/en/Journals/JournalIssues/EE	Royal Society of Chemistry
44	<i>Energy & Fuels</i>	0887-0624	2	SCI EI	http://www.pubs.acs.org/journals/enfuem	USA ACS
45	<i>Energy and Buildings</i>	0378-7788	3	SCIE EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/03787788	Elsevier Science Ltd
46	<i>Energy Conversion and Management</i>	0196-8904	3	SCIE EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/01968904	Elsevier Science Ltd
47	<i>Energy Exploration and Exploitation</i>	0144-5987	4	SCIE EI	http://www.multi-science.co.uk/eee.htm	England Multi-Science Publishing Co Ltd
48	<i>Energy Sources Part A: Renewable Utilization and Environmental Effects</i>	1556-7036	4	SCI	http://www.tandf.co.uk/journals/titles/15567036.asp	Taylor & Francis Ltd
49	<i>Engineering Analysis with Boundary Elements</i>	0955-7997	3	SCI EI	http://www.elsevier.com/locate/enganabound	Elsevier Science Ltd
50	<i>Engineering Computations</i>	0264-4401	4	SCI EI	http://www.emeraldinsight.com/0264-4401.htm	Emerald Group Publishing Limited

续表

序号	期刊题名	ISSN	分区	索引	网址	出版者
51	<i>Environmental Science & Technology</i>	0013-936X	2	SCI EI	http://pubs.acs.org/journal/esthag	USA ACS
52	<i>European Journal of Mechanics, B/Fluids</i>	0097-7546	无	SCIE EI	http://www.elsevier.fr/html/detrevue.cfm?code=JB	Gauthier-Villars
53	<i>Experimental Heat Transfer</i>	0891-6152	4	SCIE EI	http://www.informaworld.com/smpp/title~content=713770473~db=all	Taylor & Francis Ltd
54	<i>Experimental Thermal and Fluid Science</i>	0894-1777	4	SCIE EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/08941777	Elsevier Science Ltd
55	<i>Experiments in Fluids</i>	0723-4864	3	SCI EI	http://link.springer-ny.com/link/service/journals/00348/index.htm	Springer-Verlag GmbH & Company
56	<i>Fire and Materials</i>	0308-0501	4	SCI EI	http://www3.interscience.wiley.com/journal/3189/home?CRETRY=1&RETRY=0	John Wiley & Sons Ltd
57	<i>Fire Safety Journal</i>	0379-7112	4	SCI EI	http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/405896/description#description	Elsevier Science Ltd
58	<i>Flow Measurement and Instrumentation</i>	0955-5986	4	SCI EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/09555986	Elsevier Science Ltd
59	<i>Flow Turbulence and Combustion</i>	1386-6184	4	SCI EI	http://www.springerlink.com/content/100237/	Springer Netherlands
60	<i>Fluid Dynamic</i>	0015-4628	无	EI	http://www.springerlink.com/content/106469/	MAIK Nauka/Interperiodica distributed exclusively by Springer Science + Business Media LLC.

续表

序号	期刊题名	ISSN	分区	索引	网址	出版者
61	<i>Fluid Dynamics Research</i>	0169-5983	4	SCIE EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/01695983	Elsevier Science Ltd
62	<i>International Journal of Fluid Mechanics Research</i>	1064-2277	无	EI	http://dl.begellhouse.com/journals/71cb29ca5b40f8f8.html	Begell House Inc Publ
63	<i>Fluid Phase Equilibria</i>	0378-3812	3	SCI EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/03783812	Elsevier Science Ltd
64	<i>Fuel</i>	0016-2361	2	SCI EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/00162361	Elsevier Science Ltd
65	<i>Fuel Cells</i>	1615-6846	2	SCIE EI	http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/(ISSN)1615-6854	John Wiley & Sons Ltd
66	<i>Fuel Processing Technology</i>	0378-3820	2	SCI EI	http://www.sciencedirect.com/science/journal/03783820	Elsevier Science Ltd
67	<i>Fuel Science and Technology International</i>	0884-3759	无	SCIE EI	http://www.dekker.com/servlet/product/productid/FST	Taylor & Francis Ltd
68	<i>Heat and Mass Transfer</i>	0947-7411	4	SCI EI	http://link.springer-ny.com/link/service/journals/00231/index.htm	Springer-Verlag GmbH & Company
69	<i>Heat Transfer Engineering</i>	0145-7632	4	SCIE EI	http://www.tandf.co.uk/journals/tf/01457632.html	Taylor & Francis Ltd
70	<i>Heat Transfer Engineering</i>	0145-7632	4	SCIE EI	http://www.begellhouse.com/htr/htr.html	American Society of Mechanical Engineers BegellHouse Inc Publ
71	<i>Heating and Air Conditioning Journal</i>	0307-7950	无	EI	http://www.magazine-subscription-search.com/prd101817.php	EMAP Maclaren Ltd
72	<i>HPAC Engineering</i>	0017-940X	无	EI	http://hpac.com/	Penton Publ Inc

续表

序号	期刊题名	ISSN	分区	索引	网址	出版者
73	<i>HVAC & R Research</i>	1078-9669	4	SCI	http://www.ashrae.org/publications/page/544	USA ASHRAE
74	<i>IEEE Transactions on Energy Conversion</i>	0885-8969	2	SCI EI	http://www.ieee.org/organizations/pubs/trans-actions/tec2.htm	USA IEEE Power Engineering Society
75	<i>Indoor Air</i>	0905-6947	2	SCI, EI	http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1111/(ISSN)1600-0668	John Wiley & Sons Ltd
76	<i>Indoor and Built Environment</i>	1420-326X	4	SCI EI	http://ibe.sagepub.com/	SAGE Publications
77	<i>Industrial & Engineering Chemistry Research</i>	0888-5885	2	SCI EI	http://pubs.acs.org/loi/iecred	America Chemical Society
78	<i>International Communications in Heat and Mass Transfer</i>	0735-1933	3	SCIE EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/07351933	Elsevier Science Ltd
79	<i>International Journal for Numerical Methods in Engineering</i>	0029-5981	2	SCI EI	http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/(ISSN)1097-0207	John Wiley & Sons Ltd
80	<i>International Journal for Numerical Methods in Fluids</i>	0271-2091	4	SCI EI	http://www.onlinelibrary.wiley.com/journal/10.102/(ISSN)1097-0363	John Wiley & Sons Ltd
81	<i>International Journal of Chemical Kinetics</i>	0538-8066	4	SCI	http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/(ISSN)1097-4601	Wiley InterScience
82	<i>International Journal of Electrical Power & Energy System</i>	0142-0615	4	SCIE EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/01420615	Elsevier Science Ltd
83	<i>International Journal of Energy Research</i>	0363-907X	3	SCIE EI	http://www.onlinelibrary.wiley.com/journal/10.102/(ISSN)1097-0363	John Wiley & Sons Ltd

续表

序号	期刊题名	ISSN	分区	索引	网址	出版者
84	<i>International Journal of Engine Research</i>	1468-0874	4	SCI EI	http://journals.pepublishing.com/content/119772/ http://www.pepublishing.com/	Professional Engineering Publishing Imeche/UK
85	<i>International Journal of Energy</i>	1742-8297	4	SCI EI	http://www.inderscience.com/browse/index.php?journalID=135#board	Inderscience Publishers
86	<i>International Journal of Green Energy</i>	1543-5075	4	SCIE EI	http://www.informaworld.com/greenenergy	Taylor & Francis
87	<i>International Journal of Heat and Fluid Flow</i>	0142-727X	3	SCI EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/0142727x	Elsevier Science Ltd
88	<i>International Journal of Heat and Mass Transfer</i>	0017-9310	2	SCI EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/00179310	Elsevier Science Ltd
89	<i>International Journal of Hydrogen Energy</i>	0360-3199	1	SCI EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/03603199	Int. Association for Hydrogen Energy Elsevier Science Ltd
90	<i>International Journal of Low Carbon Technologies</i>	1748-1317	无	EI	http://ijlct.oxfordjournals.org/	Oxford Press
91	<i>International Journal of Multiphase Flow</i>	0301-9322	3	SCI EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/03019322	Elsevier Science Ltd
92	<i>International Journal of Multiscale Computational Engineering</i>	1543-1649	4	SCI EI	http://dl.begellhouse.com/journals/61fd1b191c7e96f.html	Begell House Inc Publishers

续表

序号	期刊题名	ISSN	分区	索引	网址	出版者
93	<i>International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow</i>	0961-5539	4	SCIE EI	http://www.emeraldinsight.com/hff.htm	England MCB Univ Press Ltd
94	<i>International Journal of Refrigeration</i>	0140-7007	3	SCI EI	http://www.elsevier.com/locate/issn/01407007	International Institute of Refrigeration (IIR) Elsevier Science Ltd
95	<i>International Journal of Solar Energy</i>	0142-5919	无	EI	http://www.tandf.co.uk/journals/titles/01425919.htm	Gordon & Breach Science Publ Inc
96	<i>International Journal of Thermal Sciences</i>	1290-0729	3	SCIE EI	http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/600004/description	Elsevier Science Ltd
97	<i>International Journal of Thermophysics</i>	0195-928X	4	SCI EI	http://www.springer.com/materials/journal/10765	Kluwer Academic/Plenum Publ Corp
98	<i>International Journal of Transport Phenomena</i>	1028-6578	无		http://www.oldcitypublishing.com/IJTP/IJTP.html	Old City Publishing
99	<i>International Journal of Wildland fire</i>	1049-8001	2	SCIE EI	http://www.publish.csiro.au/nid/114.htm	CSIRO Publishing
100	<i>Journal of Chemical and Engineering Data</i>	0021-9568	2	SCI EI	http://pubs.acs.org/journal/jceax	ACS
101	<i>Journal of Chemical Engineering of Japan</i>	0021-9592	4	SCI EI	http://www.jstage.jst.go.jp/browse/jcej	The Society of Chemical Engineers
102	<i>Journal of Chemical Technology and Biotechnology</i>	0268-2575	3	SCI EI	http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCdJCTB.html	John Wiley & Sons Inc

续表

序号	期刊题名	ISSN	分区	索引	网址	出版者
103	<i>Journal of Chemical Thermodynamics</i>	0021-9614	2	SCI EI	http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/622860/description#description	Elsevier Science Ltd
104	<i>Journal of Energy Resources Technology Transactions of the ASME</i>	0195-0738	4	SCIE EI	http://www.asmedl.org/EnergyResources	USA ASME
105	<i>Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Transactions of the ASME</i>	0742-4795	4	SCI EI	http://www.asmedl.org/GasTurbinesPower	USA ASME
106	<i>Journal of Enhanced Heat Transfer</i>	1065-5131	4	SCIE EI	http://www.begellhouse.com/journals/4c8f5faa331b09ea.html	Begell House Inc Publ
107	<i>Journal of Fire Sciences</i>	0734-9041	4	SCI EI	http://jfs.sagepub.com/	SAGE Publications
108	<i>Journal of Flow Visualization and Image Processing</i>	1065-3090	无	EI	http://www.begellhouse.com/journals/52b74bd3689ab10b.html	Begell House Inc Publ
109	<i>Journal of Fluid Mechanics</i>	0022-1120	3	SCI EI	http://www.jfm.damtp.cam.ac.uk/	Cambridge University Press
110	<i>Journal of Fluids and Structures</i>	0889-9746	4	SCI EI	http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/622877/description#description	Elsevier Science Ltd
111	<i>Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME</i>	0098-2202	4	SCI EI	http://www.asmedl.org/Fluids	USA ASME

续表

序号	期刊题名	ISSN	分区	索引	网址	出版者
112	<i>Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME</i>	0022-1481	3	SCI EI	http://www.eurekajournalwatch.org/index.php/Journal_of_Heat_Transfer-Transactions_of_the_ASME	American Society of Mechanical Engineers
113	<i>Journal of Micromechanics and Microengineering</i>	0960-1317	2	SCI EI	http://iopscience.iop.org/0960-1317/page/Highlights%20of%202009	IOP Science
114	<i>Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics</i>	0340-0204	4	SCI EI	http://www.degruyter.de/journals/jnet/de-tailEn.cfm	Walter de Gruyter GmbH & Co. KG.
115	<i>Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics</i>	0377-0257	3	SCI EI	http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/502693/description#description	Elsevier Science Ltd
116	<i>Journal of Nuclear Science and Technology</i>	0022-3131	4	SCI EI	http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/jnst/	Atomic Energy Society of Japan
117	<i>Journal of Porous Media</i>	1091-028X	4	SCI EI	http://www.begellhouse.com/journals/49dcd64dc0809db.html	Begell House Inc Publ
118	<i>Journal of Power Sources</i>	0378-7753	1	SCI EI	http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/504093/description#description	Elsevier Science Ltd
119	<i>Journal of Propulsion and Power</i>	0748-4658	4	SCI EI	http://www.aiaa.org/content.cfm?pageid=322&lupubid=24	AIAA
120	<i>Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer</i>	0022-4073	3	SCI EI	http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/272/description#description PERGAMON-ELSEVIER	Elsevier Science Ltd

续表

序号	期刊题名	ISSN	分区	索引	网址	出版者
121	<i>Journal of Renewable and Sustainable Energy</i>	1941-7012	无	SCIE EI	http://jrse.aip.org/about/about_the_journal-American	Institute of Physics
122	<i>Journal of Solar Energy Engineering Transactions of the ASME</i>	0199-6231	4	SCI EI	http://www.asmedl.org/Solar	USA ASME
123	<i>Journal of Supercritical Fluids</i>	0896-8446	2	SCI EI	http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/600250/description#description	Elsevier Science Ltd
124	<i>Journal of the Institute of Energy</i>	0144-2600	无	SCIE EI	http://journalseek.net/cgi-bin/journalseek/journalsearch.cgi?field=issn&query=0144-2600	Maney Publishing
125	<i>Journal of Thermal Analysis and Calorimetry</i>	1388-6150	4	SCI EI	http://www.springer.com/chemistry/physical/journal/10973	Akadémiai Kiadó, co-published with Springer Science + Business Media B. V.
126	<i>Journal of Thermal Biology</i>	0306-4565	4	SCI	http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/383/description#description	Elsevier Science Ltd
127	<i>Journal of Thermal Spray Technology</i>	1059-9630	3	SCI EI	http://www.springer.com/materials/surfaces+interfaces/journal/11666	Springer Boston
128	<i>Journal of Thermophysics and Heat Transfer</i>	0887-8722	4	SCI EI	http://www.aiaa.org/content.cfm?pageid=322&lupubid=26	USA AIAA

续表

序号	期刊题名	ISSN	分区	索引	网址	出版者
129	<i>Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics</i>	0167-6105	4	SCI EI	http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/505658/description#description	Elsevier Science Ltd
130	<i>JSME International Journal Series B</i>	1340-8054	无	SCIE EI	http://www.jsme.or.jp/publish/ronie_h.htm	The Japan Society of Mechanical Engineers
131	<i>Lab on a Chip</i>	1473-0197	1	SCI EI	http://www.rsc.org/publishing/journals/lc/article.asp	RSC Publishing
132	<i>Microfluidics and Nanofluidics</i>	1613-4982	2	SCI EI	http://www.springer.com/materials/mechanics/journal/10404?detailsPage=aboutThis	Springer Link
133	<i>Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering</i>	1556-7265	3	SCIE EI	http://www.informaworld.com/smpp/title~content=t713774103~db=all	Taylor & Francis Group
134	<i>Nuclear Engineering and Design</i>	0029-5493	4	SCI EI	http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/505661/description#description	Elsevier Science Ltd
135	<i>Nuclear Science and Engineering</i>	0029-5639	4	SCI EI	http://www.ans.org/pubs/journals/nse/	American Nuclear Society
136	<i>Numerical Heat Transfer (A)</i>	1040-7782	3	SCI EI	http://www.tandf.co.uk/journals/tf/10407782.html	Taylor & Francis
137	<i>Numerical Heat Transfer (B)</i>	1040-7790	3	SCI EI	http://www.tandf.co.uk/journals/titles/10407790.asp	Taylor & Francis

续表

序号	期刊题名	ISSN	分区	索引	网址	出版者
138	<i>Particle and Particle Systems Characterization</i>	0934-0866	4	SCIE EI	http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/(ISSN) 1521-4117/homepage/ProductInformation.html	Wiley-VCH
139	<i>Physics of Fluids</i>	1070-6631	3	SCI EI	http://pof.aip.org/	American Institute of Physics
140	<i>Physics of Plasmas</i>	1070-664X	2	SCI EI	http://pop.aip.org/	American Institute of Physics
141	<i>Plasma Sources Science and Technology</i>	0963-0252	3	SCI EI	http://iopscience.iop.org/0963-0252	American Institute of Physics
142	<i>Power</i>	0032-5929	4	SCIE EI	http://journalseek.net/cgi-bin/journalseek/journalsearch.cgi? field = issn&query = 0032-5929	The McGraw-Hill Companies
143	<i>Power Engineering</i>	0032-5961	4	SCIE EI	http://journalseek.net/cgi-bin/journalseek/journalsearch.cgi? field = issn&query = 0032-5961	PennWell Corporation
144	<i>Power Engineer</i>	1479-8344	4	SCIE EI	http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber = 8455	The Institution of Engineering and Technology
145	<i>Power Engineering Journal</i>	0950-3366	无	SCIE EI	http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?puNumber = 8455	IEEE
146	<i>Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers Part A-Journal of Power and Energy</i>	0957-6509	4	SCIE EI	http://journalseek.net/cgi-bin/journalseek/journalsearch.cgi? field = issn&query = 0957-6509	Professional Engineering Publishing

续表

序号	期刊题名	ISSN	分区	索引	网址	出版者
147	<i>Proceedings of the Combustion Institute</i>	1540-7489	2	SCI EI	http://www.sciencedirect.com/science/journal/15407489	Elsevier Science Ltd
148	<i>Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering</i>	0954-4100	4	SCIE EI	http://journals.pepublishing.com/content/119782/	Sage Publications
149	<i>Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanotechnology and Nanosystems</i>	1740-3499	无	EI	http://www.uk.sagepub.com/journals/Journal202027	Sage Publications
150	<i>Progress in Aerospace Sciences</i>	0376-0421	2	SCI EI	http://www.sciencedirect.com/science/journal/03760421	Elsevier Science Ltd
151	<i>Progress in Astronautics and Aeronautics</i>	0079-6050	无	EI	http://scienceindex.researchbib.com/journal/?issn=00796050&hl=en&limit=10	Researchbib
152	<i>Progress in Computational Fluid Dynamics</i>	1468-4349	4	SCI EI	http://www.inderscience.com/pctd/	Inderscience Publisher
153	<i>Progress in Energy and Combustion Science</i>	0360-1285	1	SCI EI	http://www.sciencedirect.com/science/journal/03601285	Elsevier Science Ltd
154	<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	1364-0321	2	SCI EI	http://www.sciencedirect.com/science/journal/13640321	Elsevier Science Ltd

续表

序号	期刊题名	ISSN	分区	索引	网址	出版者
155	<i>Renewable Energy</i>	0960-1481	3	SCIE EI	http://www.sciencedirect.com/science/journal/09601481	Elsevier Science Ltd
156	<i>Review of Scientific Instruments</i>	0034-6748	3	SCI EI	http://rsi.aip.org/	American Institute of Physics
157	<i>SAE International Journal of Fuels and Lubricants</i>	1946-3952	无	EI	http://sae.saejournals.org/	SAE International
158	<i>Solar Energy</i>	0038-092X	3	SCI EI	http://www.sciencedirect.com/science/journal/0038092X	Elsevier Science Ltd
159	<i>SPE Journal</i>	1086-055X	4	SCI EI	http://www.spe.org/spe-app/spe/papers/pubs/index.htm	Society of Petroleum Engineers
160	<i>The Aeronautical Journal</i>	0001-9240	4	SCI	http://www.raes.org.uk/cmspage.asp?cmsitemid=Publications_Journal	Royal Aeronautical Society
161	<i>Theoretical and Computational Fluid Dynamics</i>	0935-4964	3	SCI EI	http://www.springerlink.com/content/101184/	Springer Berlin
162	<i>Transport in Porous Media</i>	0169-3913	4	SCI EI	http://www.springer.com/earth+sciences+and+geography/journal/11242	Springer Verlag Berlin Heidelberg
163	<i>Wind Engineering</i>	0167-6105	4	EI	http://www.multi-science.co.uk/windeng.htm	Multi-Science Publishing Co Ltd

注: 1) 摘自中国科学院文献情报中心提供的《JCR 期刊影响因子及分区情况 (2009)》。

2) 索引一栏指的是否为 SCI 和 EI 源刊。其中 SCI 表示期刊被 SCI 核心内圈收录, SCIE 表示被 SCI 外圈收录, EI 表示为 EI 索引源期刊。

附录4 工程热物理与能源利用学科 有关实验室简介

附录4.1 国家重点实验室

1. 动力工程多相流国家重点实验室

依托单位：西安交通大学

实验室主任：郭烈锦教授

学术委员会主任：徐建中院士

动力工程多相流国家重点实验室于1990年经原国家计划委员会批准筹建，1992年底建成并通过验收，1993年正式对外开放。实验室共经历了3次国家级评估。1997年3月实验室接受科技部、国家自然科学基金委组织的材料与工程科学领域的第一次国家评估，被评为工程热物理与能源利用学科领域的第一名。2003年3月实验室再次接受材料与工程科学领域的国家评估，被评为工程热物理与能源利用学科领域内的第一名，同时得分名列全部工程类实验室的第一名，被评为优秀。2004年在“国家重点实验室计划实施二十周年和国家重点基础研究发展计划实施五周年纪念大会”上，实验室荣获“国家重点实验室计划先进集体”称号。在2008年2月接受第三次评估，又一次被评为材料与工程领域内的5个优秀国家重点实验室之一。

实验室的研究领域属于能源动力、能源化工与能源环境。实验室是以动力工程及工程热物理学科为依托，以西安交通大学首批国家级重点学科热能工程学科为核心支撑，吸收相关学院中从事动力工程、石油工程与环境、化工过程中多相流与传热传质、多相流与清洁燃烧理论与技术、低温制冷两相流与传热强化、相变传热及强化、数值流体力学与传热学、多相多组分工质及燃料、热物性测量与计算等方面的优秀教师，有机结合，组建成有关能源动力、能源化工、能源环境领域内的国家级基础与应用基础研究基地，为国内从事动力工程与工程热物理及相关学科的研究提供了良好的支撑条件，已经成为国家科技创新体系的重要组成部分，是我国开展多相流领域基础和应用基础研究、聚集和培养优秀科学家、开

展高层次学术交流的重要基地。实验室的主要研究方向分为 5 方面：①多相流与大型热能动力系统工程研究；②石油工程多相流与测量技术研究；③可再生与替代能源转化利用及分布式动力系统研究；④过程和系统节能与高新技术研究；⑤流动与传递现象通用理论与能量转化的物性基础研究。因此，相应设立 5 个研究部。

实验室现有固定人员 64 人，其中有教授级职称的 33 人、副教授级职称的 15 人，中国科学院院士 2 人，中国工程院院士 1 人，长江学者特聘教授 3 人、长江学者讲座教授 2 人，国家级有突出贡献专家 4 人，国家杰出青年基金获得者 7 人（A 类 4 人、B 类 3 人），教育部跨世纪和新世纪优秀人才计划入选者 18 人，全国百篇优秀博士论文获得者 6 人。

实验室从事能源动力、能源化工、能源环境、建筑节能、能源材料及装备设计与服役性能、能源经济管理及安全与发展战略等领域的基础、应用基础以及关键技术的研究；从事常规能源、可再生能源及新能源高效洁净开发转化利用及系统安全经济运行中的理论、技术与能源战略及管理等方面的创新研究；特别注重有关能源动力工程、石油工程、化学工程和环境工程中的多相流热物理热化学、多相流热物理与光化学及光电化学、多相流生物物理及化学的基础与应用基础理论及规律的研究，并拓展到过程与系统的高度集成创新研究，争取通过数个阶段的建设，建成一个具有多功能综合性开放式的能源科学基础理论与能源工业核心及关键技术、高新技术研究与创新的国家级研究基地。

通讯地址：陕西省西安市咸宁西路 28 号西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室

邮政编码：710049

电话：029-82668767

传真：029-62669033

联系人：郭烈锦

E-mail: mfoffice@mail.xjtu.edu.cn

网址: <http://www.mfpe.labs.gov.cn>

2. 内燃机燃烧学国家重点实验室

依托单位：天津大学

实验室主任：尧命发研究员

学术委员会主任：徐建中院士

内燃机燃烧学国家重点实验室于 1986 年经原国家计划委员会批准开始建设，1989 年建成并对外开放，是我国内燃机学科唯一的国家重点实验室。

实验室以国家“能源、环境”发展战略为依据,以国家内燃动力工程的科技创新为导向,开展内燃动力工程中关键科学问题的基础理论研究、内燃动力工程新技术原理的创新研究和填补国家技术空白的集成创新研究。主要研究方向为:①内燃机燃烧过程及其优化控制的研究;②燃料及燃料基础理论研究;③内燃机有害排放物的生成、对大气环境的影响及后处理技术的研究;④内燃机节能新技术和低碳动力装置研究;⑤动力机械结构强度、振动、噪声及润滑技术的研究。

实验室拥有一支专业与年龄结构合理的高水平科研梯队,现有固定人员46人,其中有教授级职称的21人、副教授级职称的18人,具有博士学位的中青年研究骨干33人,中国工程院院士1人,国家“千人计划”入选者1人,国家杰出青年基金获得者2人,长江学者特聘教授2人,教育部新世纪优秀人才支持计划入选者7人。

实验室经过20余年的建设和发展,建设了一批具有国际先进水平的专业实验室以及成套的先进仪器和装备,包括燃烧激光诊断试验室、单缸汽油机/柴油机试验室、喷雾激光测试试验室、内燃机流动测试试验室、发动机动态试验室、振动噪声试验室、排放试验室、内燃机余热能利用试验室、电子控制技术试验室、排放后处理器试验室、化学分析室、燃料电池试验室等30个试验室。目前,实验室在读博士、硕士研究生近300人。实验室成为我国开展内燃机科学技术基础和应用研究、技术创新和人才培养的基地。

通讯地址:天津市南开区卫津路92号天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室

邮政编码:300072

电话:022-27406832, 27383362

联系人:裴毅强 王海

E-mail: necl@tju.edu.cn

网址: <http://www.skile.cn>

3. 煤燃烧国家重点实验室

依托单位: 华中科技大学

实验室主任: 徐明厚教授

学术委员会主任: 陶文铨院士

煤燃烧国家重点实验室于1988年经原国家计划委员会批准筹建,1991年6月建成通过验收并正式对外开放,1997年、2003年、2008年分别通过了由国家组织的3次评估。

实验室的定位为国家级的从事煤的高效低污染利用的基础理论研究、面向国民经济主战场的技术开发和高层次专业技术人才培养的基地。实验室以高效低污染燃烧理论和技术为核心,在燃烧与污染科学和技术以及热能转换与利用相关领域开展研究,立足于燃烧与污染防治以及热能转换与利用领域的基础研究。

实验室主要从事煤燃烧理论与技术的应用基础与技术开发研究,研究领域涵盖煤的基本微观结构分析与表征、燃烧过程(着火、燃烧、燃尽)机理、污染物生成与控制、燃烧检测与燃烧过程数值模拟、先进燃烧设备开发与性能评价等。主要研究方向为:①燃料特性与湍流反应流体力学;②热能转换与利用先进技术;③能源利用中的污染物生成机理与防治技术;④热力设备与系统的诊断、优化与综合评价。

实验室现有固定人员 43 人,其中有教授级职称的 20 人、副教授级职称的 18 人,具有博士学位的中青年研究骨干 32 人,国家杰出青年基金获得者 3 人,长江学者特聘教授 3 人。

实验室拥有先进的煤燃烧分析仪器和种类齐全的燃烧试验台架,是我国煤燃烧基础和应用基础研究、技术创新和高层次人才培养的重要基地。

通讯地址:武汉市珞瑜路 1037 号华中科技大学煤燃烧国家重点实验室

邮政编码:430074

电话:027-87545526, 87542417

联系人:范伶俐

E-mail: fl@hust.edu.cn

网址: <http://nlcc.hust.edu.cn/>

4. 火灾科学国家重点实验室

依托单位: 中国科学技术大学

实验室主任: 范维澄院士

学术委员会主任: 徐建中院士

火灾科学国家重点实验室是利用世界银行贷款和国内配套投资兴建的我国火灾科学基础研究领域唯一的国家级研究机构。实验室,于 1989 年通过立项论证,1992 年获准建设边对外开放,1995 年通过国家验收,2003 年、2008 年分别通过了由国家组织的二次评估。2004 年在“国家重点实验室计划实施二十周年和国家重点基础研究发展计划实施五周年纪念大会”上,实验室荣获“国家重点实验室计划先进集体”。

实验室总体定位于火灾安全的基础研究,面向国家火灾安全的重大需求和世界火灾科学前沿,致力于火灾动力学演化理论和火灾防治关键技术原理的创新,

引领行业技术进步,发挥国家火灾安全智库作用;成为持续科技创新的研究基地,形成以火灾机理与防治关键技术为主干的学科和人才培养体系;实现全方位、多层次的国内外强强联合和科技合作,在国际火灾安全科技领域持续占有重要的一席之地。

实验室主要研究方向为:①火灾动力学演化,针对火灾孕育、发生和发展乃至突变成灾的自然过程,研究火灾和烟气形成与蔓延的机理与规律,建立体现火灾复杂性的理论模型,为火灾过程的预测提供科学基础;②火灾防治关键技术,研究清洁阻燃、智能探测和清洁高效灭火等火灾防治关键技术原理,发展新一代主动式火灾防治技术,为修订和制定火灾安全技术标准与规范提供技术支撑;③火灾安全工程理论及方法学,研究火灾系统和外界环境的相互作用,发展火灾环境下的人群疏散模型,建立耦合火灾动力学和统计理论的火灾风险评估方法学,为新兴的火灾安全性能化设计提供理论指导。

实验室现有固定人员50人,其中包括有教授级职称的19人、副教授级职称的16人,具有博士学位的研究骨干34人。研究人员中,包括院士1人,国家“千人计划”入选者1人,国家杰出青年基金获得者2人,中科院百人计划入选者4人(优秀2人),百千万人才计划入选者1人,教育部新世纪优秀人才计划入选者8人,全国优秀百篇博士学位论文获得者1人,安徽省青年科技奖获得者1人,中国科学院王宽诚青年人才奖获得者2人。

火灾科学国家重点实验室已发展成为国内外同行广泛认可、火灾科技上中下游相互促进协调发展、特色鲜明和充满生机活力的火灾科学基础研究和高层次人才培养的知名基地。

通讯地址:安徽省合肥市金寨路96号中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室

邮政编码:230026

电话:0551-3601651

联系人:陈军

E-mail: sklfs@ustc.edu.cn

网址: <http://sklfs.ustc.edu.cn>

5. 汽车安全与节能国家重点实验室

依托单位:清华大学

实验室主任:欧阳明高教授

学术委员会主任:柳百成院士

汽车安全与节能国家重点实验室于1989年经原国家计划委员会批准筹建,

1995 年建成并通过验收并正式对外开放, 1997 年、2003 年和 2008 年先后顺利通过了由国家组织的 3 次评估。

围绕汽车“安全、节能、环保”三大主题以及我国国民经济发展中的重大需求, 实验室自创建以来, 瞄准国际前沿、国家目标, 定位于汽车工业共性关键技术、汽车工程交叉学科基础理论, 逐步形成了自己的优势领域和特色, 主要包括汽车主动与被动安全性(碰撞安全性、制动安全性、主动避撞与智能交通)、新能源汽车(纯电动汽车、混合动力电动汽车、燃料电池电动汽车以及代用燃料汽车)、汽车环保技术(汽车排气污染控制、汽车噪声控制、汽车绿色设计与制造)、节能环保发动机技术(先进燃烧技术与排放控制、先进涡轮增压技术)以及汽车工业发展战略。

实验室现有固定人员 63 人, 其中包括有教授级职称的 23 人、副教授级职称的 35 人, 具有博士学位的中青年研究骨干 33 人, 国家杰出青年基金获得者 1 人、长江学者特聘教授 2 人。2010 年获 2 项“国家发明技术二等奖”。

实验室形成了具有总体国内领先和部分国际先进水平的科研基地, 在跨地区、跨学科集成创新研究中发挥了国家公共科研基础平台作用。作为中国汽车工程学会发动机分会、汽车安全技术分会、电动汽车分会、中国内燃机学会油品与清洁燃料分会四个分会的主任单位, 实验室在相关研究领域学术活动中发挥了主导作用。目前实验室与国际大公司研究中心的技术合作研究已进入规模化和可持续发展的新阶段。

通讯地址: 北京市海淀区清华大学汽车安全与节能国家重点实验室

邮编: 100084

电话: 010-62785708

联系人: 皮新玲

E-mail: ase@tsinghua.edu.cn

网址: <http://car.tsinghua.edu.cn>

6. 能源清洁利用国家重点实验室

依托单位: 浙江大学

实验室主任: 骆仲泐教授

学术委员会主任: 黄其励 院士

能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学)于 2005 年经国家科技部批准建设, 2006 年 6 月通过验收, 2008 年通过了国家组织的评估, 取得了良好的成绩。

实验室的定位以国家能源战略需求及学科前沿为指导, 组建国际一流的能源与环境科技创新技术平台, 汇集和培养优秀科研人才, 研究能源科学领域世界前

沿的关键和核心课题,为我国能源与环境的高技术产业发展提供原创性的、具有自主知识产权的核心技术,为我国能源与环境的重大需求提供科学技术支撑。实验室从基础、应用基础研究和产业化示范再到商业化应用,研究开发了拥有自主知识产权的系列成果。

实验室主要从事能源科学与技术基础和应用基础研究,结合国家能源战略与国民经济建设需求,在能源与环境领域以化石燃料的高效清洁利用,新能源及先进能源系统,低品位能源的高效清洁利用,能源利用过程中的污染物生成、迁移、测量及控制,复杂反应系统中的理论模拟及数值试验等为主要研究方向,并已形成了鲜明的研究特色。

实验室现有固定人员51人,其中院士1人,教授27人,副教授16人,博士生导师24人,硕士生导师38人;拥有国家杰出青年基金获得者4人、教育部长江学者奖励计划特聘教授5人、国家973首席科学家2人、中国青年科技奖获得者2人、中国青年科学家提名奖获得者1人、国家批准有突出贡献的中青年专家1人、霍英东优秀青年教师奖获得者2人、国家“百千万人才工程”入选者6人、教育部新(跨)世纪优秀人才计划入选者10人。

实验室国际交流与合作十分活跃,与国外著名的研究高校和世界著名企业成立了“浙江大学-瑞典皇家工学院清洁能源联合研究中心”、“浙江大学-普林斯顿大学氢能联合研究中心”、“浙江大学-利兹大学可持续能源国际研究中心”、“浙江大学-伊利诺伊大学生物质能利用中心”、“浙江大学-瑞典隆德大学能源利用激光诊断中心”、“浙江大学-斯坦福大学燃烧化学联合实验室”、“浙江大学-法国液化空气集团富氧燃烧联合实验室”和“浙江大学-必和必拓烧结床联合实验室”等联合研究基地,近年来承担了欧盟框架项目、中美合作协议项目、中意合作项目、中法先进研究计划项目、中日绿色援华计划等国际合作项目30余项,主办或承办国际会议21次,任国际系列会议大会主席/联合主席18次,国际会议大会特邀报告19次,这些都有力提升了实验室的国际影响力和国际声誉。

通讯地址:浙江省杭州市浙大路38号

邮政编码:310027

电话:0571-87952440

传真:0571-87951616

联系人:骆仲泐

E-mail: zyluo@zju.edu.cn

网址: <http://www.ceu.zju.edu.cn>

附录 4.2 省部级重点实验室

1. 传热强化与过程节能教育部重点实验室

依托单位: 华南理工大学 **共建单位:** 北京工业大学

实验室主任: 樊栓狮教授

学术委员会主任: 陶文铨院士

传热强化与过程节能教育部重点实验室前身是原国家教育委员会于 1994 年 1 月批准成立的传热与节能国家教委开放研究实验室, 于 1995 年 3 月建成并正式对外开放。2001 年 8 月实验室经教育部批准, 形成以华南理工大学为主体, 有清华大学、北京工业大学参加的联合实验室, 并分别于 2002 年、2007 年通过了教育部组织的评估, 此后延续了华南理工大学、北京工业大学联合共建的形式。

实验室的目标是结合我国能源与化工的发展需要, 开展工程热物理、热力学、传递过程与能量利用系统工程的基础理论研究, 开发适合我国国情的节能新技术, 提高能源利用效率, 减少能源的消耗。

实验室主要从事能源工程学科基础与应用研究, 研究领域涵盖传热强化机理和设备控制、能源终端利用的优化、能源高效利用材料的制备和表征等。主要研究方向包括以下 5 个方面: ①节能与先进能源系统; ②传递过程强化与控制理论; ③环境能源材料技术; ④可再生能源技术; ⑤天然气利用技术与策略。

实验室现有固定人员 58 人, 其中包括有教授级职称的 30 人、副教授级职称的 18 人, 具有博士学位的中青年研究骨干 39 人, 国家杰出青年基金获得者 3 人, 长江学者 2 人, 教育部新世纪优秀人才入选者 4 人。

实验室拥有先进的热测试分析仪器、能源材料制备设备及多种工程模拟软件, 是我国传热强化与过程节能基础与应用研究、技术创新、及高层次人才培养的基地。

通讯地址: 广州五山路 381 号华南理工大学传热强化与过程节能教育部重点实验室

邮政编码: 510640

电话: 020-87113870, 22236581

联系人: 王磊

E-mail: wangleif@scut.edu.cn

网址: <http://www.scut.edu.cn/energy-keylab>

2. 动力机械与工程教育部重点实验室

依托单位：上海交通大学

实验室主任：黄震教授

学术委员会主任：蔡睿贤院士

动力机械与工程教育部重点实验室于2000年8月经教育部批准正式成立并开放运行,2007年在教育部组织的工程与材料科学领域教育部重点实验室评估中被评为优秀重点实验室。

实验室的定位是以国家重大需求及学科发展前沿为导引,开展能源转化与动力工程的应用基础研究,进行知识和技术创新,不断探索提高能源利用效率、减少能源利用过程中污染物排放的基本原理和方法,发展高效、清洁、安全、可靠的替代能源和新能源动力系统,为国家能源可持续发展提供理论和技术支持。

实验室主要研究方向有热力循环理论与系统性能及仿真、热流体力学与叶轮机械、发动机燃烧与排放控制、动力总成及控制、微动力系统传热传质、热驱动制冷系统热动力学等。

实验室现有固定人员48人,其中包括有教授级职称的23人、副教授级职称的20人、讲师5人,教师中获博士学位比例达90%;固定人员中有中国工程院院士2人,国家杰出青年基金获得者3人,长江学者特聘教授3人。

实验室拥有先进的激光流场测试仪器和动力机械燃烧试验装置,是我国动力机械与工程领域高层次人才培养的基地和具有国际学术影响的科技创新和学术交流中心。

通讯地址：上海市东川路800号上海交通大学动力机械与工程教育部重点实验室

邮政编码：200240

电话：021-34205949

联系人：林赫

E-mail：linhe@sjtu.edu.cn

网址：<http://pmelab.sjtu.edu.cn>

3. 传热强化与过程节能教育部重点实验室暨传热与能源利用北京市重点实验室

依托单位：北京工业大学

实验室主任：马重芳教授

学术委员会主任：过增元院士

实验室于2001年分别经国家教育部和北京市教育委员会批准筹建,2002年、

2007 年传热强化与过程节能教育部重点实验室通过了由教育部组织的两次评估, 传热与能源利用北京市重点实验室于 2007 年和 2009 年通过了北京市教委组织的中期评估和验收。

实验室以国家和北京市的节能减排和发展低碳经济作为实验室活动的目标和方向, 强调学科交叉点、科技制高点和市场切入点的整合, 全面落实“从以基础研究为主转向基础研究、应用研究及产品研发并重, 从单一学科研究转向多学科交叉, 以及从国内逐步向跨国交流与合作发展”的重点实验室整体发展战略, 研制先进节能减排产品技术, 把实验室建设成为推动首都向低碳社会和低碳经济加速转型, 为低碳经济提供技术支撑和整体解决方案的研发基地和人才培养基地。

重点实验室立足国家“节能减排”和构建“低碳经济”这一重大战略目标开展科学研究, 形成了“以先进高效能源转换技术研究为突破口, 努力开发高效节能技术与可再生能源利用技术, 致力于为首都北京提供全面能源解决方案”的研究特色。主要研究方向包括: ①先进节能技术与强化传热, 包括低温热源高效热功转换、建筑节能等; ②可再生能源利用的理论与技术, 包括太阳能热发电、地源热泵及地热发电等; ③微型能量系统与微尺度传热。

实验室现有固定人员 21 人, 其中有教授级职称的 8 人、副教授级职称的 8 人, 具有博士学位的教师 13 人。

实验室拥有 PIV 激光测速仪、同步热分析仪、高温黏度计等先进能源分析测试仪器和一大批热功转换、强化传热和制冷试验台, 是我国节能和可再生能源基础和应用研究及人才培养基地。

通讯地址: 北京市朝阳区平乐园 100 号北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室

邮政编码: 100124

电话: 010-67392774, 010-67392818

联系人: 马重芳

E-mail: machf@bjut.edu.cn

网址: <http://energy.bjut.edu.cn>

4. 热科学与动力工程教育部重点实验室

依托单位: 清华大学

实验室主任: 姚强 教授

学术委员会主任: 倪维斗 院士

热科学与动力工程教育部重点实验室前身是煤的清洁燃烧技术国家重点实验室。2004 年 5 月整合从事热科学基础研究和燃气轮机关键技术基础研究的人员进

入实验室,并以清华大学热能动力工程及热科学重点实验室开始运行。2005年6月将“传热强化与过程节能”教育部重点实验室清华分室并入本实验室。2005年8月正式以“热科学与动力工程”教育部重点实验室开始对外开放运行。2007年9月参加教育部重点实验室的部门重点实验室评估,被评为A类,并被推荐参加2008年国家重点实验室系列的评估获得良好。

实验室以能源的高效转换和清洁利用为核心,以传热学、热力学、流体力学、燃烧学及系统科学为基础,以满足国家能源特别是化石能源的安全高效利用提供科技理论创新和先进技术为目标,以热科学和可持续发展科学理论为指导开展相关基础及应用基础研究。

主要研究方向为:①传热学与热力学:微细尺度热质传递、多孔介质中传热与传质、相变传递过程与机理、能源动力与高技术领域中的特殊传热问题、纳米尺度热质传递、传热强化与优化、生物体热物性与生物传热、流体工质热物性;②燃烧科学与技术:固体燃料流态化燃烧、煤粉燃烧、燃烧化学反应动力学、催化燃烧、极限燃烧、湍流多相流动与燃烧、燃烧过程非线性现象的动力学研究;③气动力学与多相流动:气动力学、湍流多相流动与燃烧、燃烧过程非线性现象的动力学研究、气液两相流动与传热;④燃气轮机关键技术基础:气动热力设计方法、低污染燃烧、先进冷却方法、自动控制方法、结构强度与振动、燃气轮机的多学科设计优化;⑤节能热技术与理论:节能科学与理论、热系统优化与热管理、强化传热技术及新型换热器、节能环保型制冷空调技术与设备、工业余热回收与利用、可再生能源中的关键热物理问题;⑥污染控制理论与技术:二氧化硫形成与控制、氮氧化物形成与烟气脱硝、燃烧源颗粒物形成与控制、温室气体二氧化碳控制、微量及其他污染物、火灾毒害物质形成与控制。

实验室现有固定人员67人,其中中国科学院院士2名、中国工程院院士3名,教授、研究员22人,副教授高工21人;具有博士学位研究人员57人,占教师队伍83%;国家杰出青年基金获得者2名,长江学者特聘教授4名,中国青年科技奖获得者2名。

实验室购置和设计建设了一大批大型的精密仪器和试验台架,总价值达5942多万元,其中近5年购置的占极大部分。目前实验室的设施和设备条件与国内各高等院校相比都是比较完备和先进的,仪器设备水平处于国内领先地位。实验室是我国热科学与动力工程领域基础和应用基础研究、技术创新和人才培养的重要基地。

通讯地址:北京市清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室

邮政编码:100084

电话:010-62782108, 62788668

联系人: 姚强

E-mail: yaoq@tsinghua.edu.cn

网址: <http://tspe.tsinghua.edu.cn>

5. 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室

依托单位: 华北电力大学

实验室主任: 刘吉臻教授

学术委员会主任: 黄其励 院士

电站设备状态监测与控制实验室于 2004 年底经教育部批准建设, 2006 年 12 月建成通过验收, 并正式对外开放。

实验室的定位是围绕保障我国电力生产的安全、高效运行这一中心任务, 建设开放的电站监控信息系统平台, 汇聚优秀人才, 开展电站设备状态监测、控制和过程节能的应用基础研究和高新技术研究, 使实验室成为电力能源科学与工程领域的高端科研基地, 并促进学科领域的拓展与深入。

实验室以大型火电机组的安全、高效和清洁运行为主题, 开展电站设备状态分析与失效预防、大机组运行关键技术和火力发电过程节能等共性问题的应用基础研究。主要研究方向为: ①大型旋转机械振动监测与故障诊断; ②电站热过程的状态监测与控制; ③高温材料特性及状态评估; ④基于网络的电站设备状态监控与优化控制。

实验室现有研究人员 54 人, 具有博士学位的研究人员比例达到 67%, 45 岁以下的中青年学术骨干比例达到 77%。实验室固定研究人员中有国家杰出青年基金获得者 3 人; “电站设备状态监测与失效预防”团队入选教育部创新团队。

实验室拥有先进高温金属材料 and 煤质元素分析测试仪器, 具备完善的燃烧、多相流动与传热实验研究平台, 是能源动力应用基础研究、技术创新和人才培养基地。

通讯地址: 北京市昌平区北农路 2 号华北电力大学电站设备状态监测与控制教育部重点实验室

邮政编码: 102206

电话: 010-51971325

传真: 010-51971328

联系人: 席新铭

E-mail: xixinming@ncepu.edu.cn

网址: <http://cmc.ncepu.edu.cn>

6. 中国科学院风能利用（联合）重点实验室

依托单位：中国科学院工程热物理研究所与中国科学院电工所共建

实验室主任：许洪华研究员

学术委员会主任：徐建中院士

中国科学院风能利用（联合）重点实验室是由中国科学院工程热物理研究所与电工所共建的实验室，于2008年12月经中国科学院批准成立。

实验室的总体目标是成为我国大规模风能利用技术的研究基地，在风能转换机理与效率研究，大型风电机组控制与变流技术，利用蒸发冷却技术研制大型风力发电机，大型风电叶片设计、制造、检测等科学与技术方面达到国际一流水平。本实验室为国家和企业提供风能产业化应用中的关键装备和系统设计的综合解决方案，为我国风能产业健康持续发展提供技术支撑。

实验室致力于战略性高新技术的原始创新，不断形成风电叶片与控制领域的具有自主知识产权的核心技术，同时开展风电机组和叶片的测试技术、故障诊断技术、远程监控技术的研究，逐渐形成集风力机空气动力学、材料力学、结构动力学、电力电子与电力传动、电机技术、控制理论、检测技术、模式识别与智能系统、通信与信息系统等多学科交叉的综合性学科，实验室将理论研究与实验研究并重，突出自己的学科特色和综合优势。

实验室目前固定研究人员53人，其中中国科学院院士2人，博士生导师13人，正高级职称16人；中国科学院百人计划入选者3人。

实验室拥有国家级风电叶片检测中心，拥有完整的用于风电叶片、电机、传动系统开发与检测的软件体系及综合试验台、测试设备和仪器等，是我国风电领域基础和应用研究、技术创新和人才培养基地。

通讯地址：北京市海淀区北四环西路11号中国科学院工程热物理研究所

邮政编码：100190

电话：010-82543038, 010-82547008

联系人：许洪华

E-mail：yangke@iet.cn

网址：hxu@mail.iee.ac.cn

7. 国家能源风电叶片研发（实验）中心

依托单位：中国科学院工程热物理研究所

实验室主任：徐建中院士

学术委员会主任：赵晓路研究员

国家能源风电叶片研发(实验)中心于2009年经国家能源局批准筹建,主要开展风能利用技术中前瞻性的基础研究和高新技术开发工作,研究方向包括风力机专用翼型、钝尾缘叶片、仿生叶片、低噪声叶片、智能叶片、风电场微观选址及优化设计、海上风电机组、风电储能系统和基于风力机为动力的海水淡化系统等为核心的新一代风能利用的基础研究及高新技术研究。

中心目前固定研究人员42人,其中中国科学院院士1人,高级专家9人,具有博士学位的11人(与高级专家人数不重复计算),中科院百人计划入选者3人。

中心的建设目标是建设兆瓦级以上大型及超大型风电叶片设计、制造及工艺技术为主的核心技术研发创新平台;以建设高水平的、可持续的科技创新能力为主线,为风电叶片产业的发展提供核心技术和装备;建设世界级的风电叶片公共实验平台;成为国际知名的风电叶片研发中心,成为风电叶片研究与制造领域有影响的国际合作科研平台。

中心下设国家级风电叶片检测中心,拥有先进风电叶片开发与检测的软件体系及综合试验台、测试设备和仪器等,是我国风电领域基础和应用研究、技术创新和人才培养基地。

通讯地址:北京市海淀区北四环西路11号中国科学院工程热物理研究所

邮政编码:100190

电话:010-82543038

联系人:杨科

E-mail: yangke@iet. cn

网址: <http://www. etp. ac. cn/jgsz/kybm/fd/>

8. 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室

依托单位: 重庆大学

实验室主任: 张力教授

学术委员会主任: 岑可法院士

低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室于2009年经教育部批准筹建,预计将于2012年底建成并对外开放。

实验室主要从事低品位能源利用的基础和应用研究,研究领域涵盖能源梯级利用系统及相关基础理论、低品位燃料高效燃烧及污染物控制、中低温热能利用新技术、微生物能源转化理论、生物质能热化学转换理论及技术、近零排放的废弃物资源化、分布式能源系统模拟理论及方法、分布式能源系统集成、西部农村及城镇分布式能源系统等。主要研究方向为: ①化石低品位能源的高效利用;

②可再生低品位能源高能转换技术及系统；③低品位分布式能源系统。

实验室现有固定人员 40 人，其中有教授级职称的 20 人、副教授级职称的 12 人，具有博士学位的固定人员为 38 人；国家杰出青年基金获得者 1 人，长江学者特聘教授 1 人。

实验室的定位是以国家科技和社会发展相关的能源战略和能源安全的需求及学科前沿发展为指导，开展低品位能源利用方面的应用基础研究，在基础方面提供以低品位化石和生物质能源梯级利用、分布式能源系统为主的关键性的理论依据和原理性技术支撑，在应用研究方面为国家研制化石及生物质能源利用装置和系统，分布式能源解决方案技术。

实验室拥有先进能动的测试仪器和较全面的各类研究平台设备，是我国低品位能源基础和应用研究、技术创新和人才培养基地。

通讯地址：重庆市沙坪坝区沙正街 174 号低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室

邮政编码：40044

电话：023-65111297, 65105655

联系人：张力

E-mail: lizhang@cqu.edu.cn

网址: <http://cte.cqu.edu.cn/ResDefault.aspx>

9. 热流科学与工程教育部重点实验室

依托单位：西安交通大学

实验室主任：何雅玲教授

学术委员会主任：蔡睿贤院士

热流科学与工程教育部重点实验室是教育部 2010 年 11 月下发文（教技函[2010] 98 号）正式获准立项建设的教育部重点实验室。

实验室的定位是针对国家节能减排的重大需求和前沿科学问题，围绕能源转换和利用过程中的基础热流科学问题，瞄准国际前沿方向进行系统深入的前瞻性和战略性研究工作，重点开展流体热物性及新型热力循环、强化传热传质机理与新技术、热流科学中的数值模拟及其工程应用、节能原理与减排新技术等方面的研究，建设成为能源利用与转换过程中热流科学与技术领域的跨学科、跨专业领域的综合交叉型的研究基地和原始性创新的研究基地，热力学、传热学、流体力学等专业基础课教学基地以及能源与动力类专业人才的培养基地。所开展研究工作突出“基础性、综合性、国际性”特色，注重能源学科与其他学科综合交叉。

实验室现有固定人员 39 人，其中教授 18 人，副教授 8 人，具有博士学位的

中青年研究骨干 33 人; 拥有中国科学院院士 1 名, 国家级教学名师 2 名, 国家级有突出贡献专家 1 名, 长江学者特聘教授 1 名, 长江学者讲座教授 2 名, 国家杰出青年科学基金获得者 3 名 (其中 A 类 2 名、B 类 1 名), 新世纪百千万人才工程国家级人才 1 名, 教育部跨世纪、新世纪优秀人才计划入选者 12 名, 全国百篇优秀博士论文获得者 3 名, 西安交通大学“腾飞人才计划”特聘教授 5 名。研究队伍还包括 100 余名博士、硕士研究生以及多名博士后人员, 是一支年龄结构合理、科研能力强、在国内外具有影响的研究队伍。

实验室拥有先进的流动与传热、可再生能源等分析测试仪器与装备, 是我国热流科学与技术领域的跨学科、跨专业领域的综合交叉型和原始性创新研究基地以及能源与动力类专业人才的培养基地。

通讯地址: 西安交通大学能源与动力工程学院热流科学与工程教育部重点实验室

邮政编码: 710049

电话: 021-82665930, 82668727

联系人: 何雅玲

E-mail: yalinghe@mail.xjtu.edu.cn

网址: <http://thermofluid.xjtu.edu.cn>